

고해상도 SAR 영상의 활용기술 동향분석

Investigation of Applications Technology for High Resolution SAR Images

윤근원* 고진우* 이용웅*
Geun-Won Yoon Jin-Woo Koh Yong-Woong Lee

Abstract

SAR(Synthetic Aperture Radar) has characteristics well-suited for the measurement of geophysical parameters during day and night in all weather conditions. Recently, SAR data with high resolution acquired by satellites became available to the public. In such data, many features and phenomena of geometric structure of man-made objects and natural environments become observable. In this paper, we discuss main considerations including geometric distortion and coregistration for efficient utilization of high resolution SAR images. And, various advanced technologies in SAR application fields are introduced.

Keywords : High Resolution SAR(고해상도 SAR), Application Technology(활용기술), InSAR(위상간섭기술), POLSAR(다중편광기술), Tomography(3차원 이미징기술), GMTI(이동물체탐지기술)

1. 서론

SAR(Synthetic Aperture Radar) 관측 기술은 광학원격탐사와 함께 위성 탑재체 활용과 위성개발계획의 핵심을 이루고 있으며, 선진국에서도 SAR의 개발과 활용기술 개발에 가장 많은 연구와 투자가 이루어지고 있다. 이 기술은 능동형 극초단파 관측방식으로써 EO/IR(Electro-Optical/InfraRed) 영상과 비교하였을 때 다음과 같은 장점을 가진다^[1]. 첫째, 거리에 무관하게 일정한 해상도를 가진다. 둘째, 능동형 소자를 이용하여 영상을 형성하므로 밤과 낮에 구애받지 않고, 전파의 투과 특성으로 인하여 구름이 존재하는 상황에서

도 영상 형성 가능하므로 전천후 운용 능력을 보유한다. 셋째, 해상도가 향상될수록 부가되는 시스템 기술적 난이도가 EO/IR 보다 상대적으로 적다. SAR 시스템은 전송 전파의 대역폭을 확장하면 해상도가 향상되기 때문에 EO/IR 시스템보다 해상도 향상에 따른 기술적 위험도가 적다. 넷째, 전파 고유의 특성을 이용하여 활용 분야가 아주 다양하다. 예를 들면, 시간에 따른 지표 미세 변화 및 변위를 감지하는 변화탐지(change detection), 지표의 고도를 추출하여 3차원 영상을 생성하는 Interferometry 및 고정/이동 표적 탐지, 곡물 성장 상태 모니터링, 해양 상태 모니터링, 3차원 단면적 정보 추출 등이다.

이러한 SAR는 1950년대 초 군사적 목적에서 지상의 영상을 획득하기 위한 방법으로 기술개발이 시작되었으며, 1970년대 후반에는 최초의 민간용 인공위성 SAR인 SEASAT이 발사되었고, 1990년대 초에는 ERS-

† 2009년 9월 17일 접수~2009년 12월 18일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 윤근원(gwyoonyon@yemail.com)

1/2, JERS-1 및 RADARSAT-1이 발사되어 민간 목적으로 사용되기 시작했다. 최근에는 공간해상도 약 1m의 고해상도 X-band SAR 위성인 TerraSAR-X(독일), COSMO-SkyMed(이탈리아)가 성공적으로 발사되었으며, 분석결과 우수한 성능을 보이고 있다. 국내에서도 2010년에 최고 공간해상도 약 1m의 X-band SAR 위성인 KOMPSAT-5를 발사할 예정이다. 또한, 군사 정찰 SAR 위성으로 미국에서는 Lacrosse-5를 2005년에 발사하여 운용 중이고, 독일에서도 SAR-Lupe를 운용 중이다. Table 1은 각 국가의 주요 고해상도 SAR 위성에 대하여 정리한 표이다. 이와 같이, 군사적인 목적에서 태동한 SAR 센서는 민간에서도 많이 이용되고 있지만 여전히 군사적인 정찰 목적으로 그 활용 가능성은 무척 높다 할 수 있다. 본 논문에서는 관측위성을 중심으로 고해상도 SAR 영상의 특징과 민간분야의 주요 활용 기술별 동향에 대하여 기술한다.

2. 고해상도 SAR 영상활용 고려사항

고해상도 SAR 자료의 다양한 활용이 가능함에 따라 지금까지의 중저해상도 영상과는 다르게 새로운 고려사항을 포함한 접근이 필요하다. 주요 고려사항으로는 레이오버(layover) 현상과 같은 기하 왜곡 현상과 영상 정합에서의 고도정보를 고려한 기하학적 영상정합(geometric coregistration)등이 있다.

가. 기하 왜곡 현상

SAR 영상은 영상 획득의 기하(geometry) 때문에 영상에서 기하학적인 왜곡 현상이 존재한다. Fig. 1은 SAR 영상에서 건물 주변의 전형적인 현상에 대한 그림이며^[2], layover는 수직의 건물 외곽 벽과 같은 가파른 고도 차이를 가지는 부분에서 발생한다. 이는 센서 방향으로 센서와 지표 객체 사이에 동일한 거리를 가

Table 1. The high resolution SAR Satellites

위성명(보유국)	형상	최고해상도(밴드)	발사시기	비고
Lacrosse-5 (미국)		1m 이하(X)	'05.4	초대형위성
Space Radar (미국)		0.5m(X)	'15(1호)	위성군(9기) 운용계획
Kondor-E (러시아)		1~2m(S)	'09 예정	
JianBing 5 (중국)		5m 이하(L) (추정)	'06.4	
IGS-1B/4B (일본)		1~3m(L)	'03.3, '07.2	1B 고장
RISAT 1 (인도)		3m 이하(C)	'09~'10 예정	
SAR-Lupe (독일)		1m 이하(X)	'06~'08	위성군(5기) 운용
TerraSAR-X (독일)		1m(X)	'07.6	TanDEM-X ('09년 발사 예정)
COSMO-SkyMed (이탈리아)		1m 이하(X)	'07~'09	위성군(4기) 운용 4호는 '09년 발사예정
TECSAR (이스라엘)		1m 이하(X)	'08.1	
RADARSAT-2 (캐나다)		3m(C)	'07.12	
KOMPSAT-5 (대한민국)		1m(X)	'10.5	

하지만 다른 위치에 존재하는 객체가 존재하는 경우로써, 지붕, 건물 벽, 건물 전면의 지표 등과 관련이 있다. 그리고 입사각에 따라 전면이 짧게 보이는 전방 압축(foreshortening)이 발생할 수도 있다. 또한, 건물과 지표에서는 double-bounce로 인하여 방위(azimuth) 방향으로 밝은 값을 가지는 선이 생긴다. 그리고 건물의 반대편 지표에서는 신호가 돌아오지 않아 영상이 어둡게 나타나는 지역이 존재하는데 이를 음영(shadow)이라 한다.

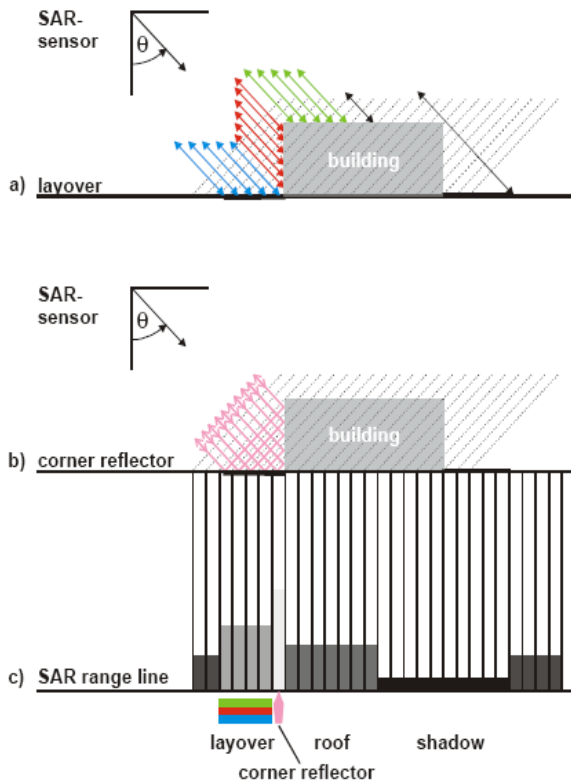


Fig. 1. SAR phenomena at a flat roofed building

Fig. 2는 TerraSAR-X 영상으로 촬영한 이집트의 피라미드이며, azimuth 방향으로 위성이 진행하면서 거리(range) 방향으로 파를 송수신한 그림이다. 전면부의 foreshortening 현상과 후면부에 shadow 현상을 볼 수 있다^[3]. 이러한 layover를 분석하기 위한 연구로 interferometric phase slope를 이용하는 방법, DEM (Digital Elevation Model)을 이용하는 방법, 통계학적 방법, multi-baseline interferometry를 이용하는 방법들이 있다^[4]. 이와 같은 현상들은 중저해상도 SAR 영상에

서도 산지 지역과 같은 곳에서 동일하게 발생하였지만, 고해상도영상의 활용에 있어서 관심지역의 상황에 따라 더욱 세밀한 고려가 필요하다.



Fig. 2. TerraSAR-X images of the pyramids

나. Geometric coregistration(기하학적 영상정합)

기존의 중저해상도의 SAR Interferometry 등을 위한 영상 정합 적용 시, 진폭상관계수 또는 위상선명도 등의 방법을 이용하여 두 SAR 영상간의 정합점을 찾은 후, 이를 이용한 모델링 수행에서는 지형고도에 따른 영향을 고려하지 않고 affine 또는 고차다항식을 통상적으로 이용하였다. 이는 일반적으로 Interferometry에 적합한 baseline을 고려할 때 지형고도에 따른 오프셋(offset) 영향이 약 0.1 화소 이내이기 때문에 이러한 모델링 결과만을 가지고 부영상을 재배열하는 과정에 크게 문제가 없었기 때문이다. 그러나 최근에 1~4m의 높은 공간해상도를 갖는 SAR 영상에서는 두 SAR 자료의 baseline이 크고 산지지형인 경우에 offset 영향이 1 화소에 이른다. 따라서 지형고도에 의한 정합점 이동에 의한 영향을 고려하지 않고 부영상을 재배열할 경우 산악지역에서 긴밀도는 크게 떨어지게 된다^[5]. 따라서 지형고도를 고려하기 위하여 DEM과 같은 지형고도자료를 사용하여 offset 영향을 계산할 수 있으며^[6,7], 이를 geometric coregistration이라 한다. 이러한 알고리즘을 이용하여 영상 정합을 수행하면 Fig. 3과 같이 coherence가 향상된 결과를 보인다^[8]. 따라서 더 우수한 영상 정합 결과를 가지게 되며, 이는 각 활용분야의 최종 결과에 향상된 영향을 미친다.

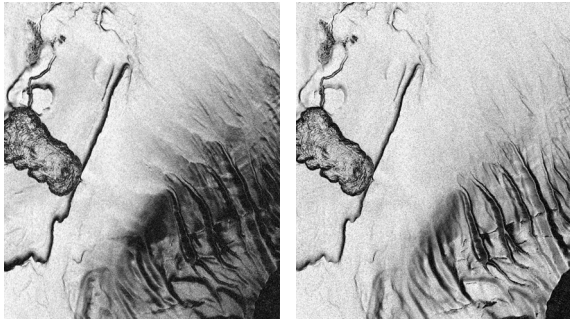


Fig. 3. Coherence images using(left) traditional coregistration(right) geometric coregistration

3. 영상활용 기술별 동향

활용 기술 분야에 대한 분류와 선정은 국외 학술지에 게재된 논문들을 조사 및 분석한 결과를 바탕으로 하였다⁹⁾. Fig. 4의 모든 밴드를 대상으로 한 활용기술 연구 분포에서 보는 바와 같이 InSAR 기술과 관련된 활용이 많았으며, POLSAR도 많은 부분을 차지한다. 3차원 이미징 기술인 tomography와 ATI(Across-Track Interferometry)도 연구 중이다. 향후 KOMPSAT-5와 같은 신규 위성이 발사되면 활용이 더욱 활발해질 것으로 예상된다. 하지만, 주로 행성탐사 분야에서 SAR의 밝기 값을 이용하여 지표면의 경사각을 근거로 DEM을 얻는 Radarclinometry와 서로 다른 각도에서 촬영한 두 장의 영상을 이용하여 입체효과를 계산하는 Radargrammetry는 최근 X 밴드 고해상도 SAR의 경우에는 활용 사례가 활발하지 못하다.

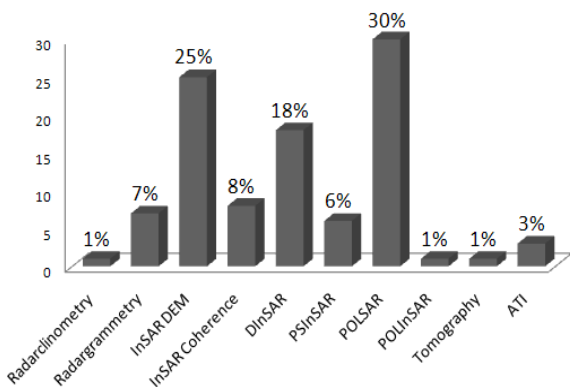


Fig. 4. Distribution of journal papers related to the SAR advanced technologies

가. 지형고도정보 생성 기술

InSAR(SAR Interferometry 혹은 IFSAR)는 일반적인 SAR 기술과 간섭기술의 종합 기술이며, 적용 방법은 동일한 산란체로부터 얻어지는 두 개 이상의 SAR 자료의 위상(phase)정보를 이용하여 정밀한 지형고도(DEM) 혹은 지표면의 미세변위를 구하는 기술이다. 이 위상정보를 이용한 지표면의 측정은 cm 또는 mm단위의 정밀도를 제공한다.

InSAR 기법을 이용한 DEM 제작은 두 개의 SAR 영상간의 coregistration(정합), 부영상의 재배열, phase unwrapping, geocoding 과정 등이 주요한 자료처리 단계이며 이들 단계에 대한 연구들이 주로 수행되고 있다.

두 SAR 영상간의 coregistration 과정은 크게 진폭상관계수를 이용하는 방법¹⁰⁾과 fringe의 명확도를 이용하는 방법¹¹⁾이 사용된다. 진폭상관계수가 일반적으로 사용되는 방법이나, 경사가 완만한 지역에서 진폭영상에서의 밝기 값의 변화가 거의 없는 경우 fringe 명확도를 이용하는 방법이 효과적이다. 두 가지 방법 모두 널리 사용되고 있지만, 고해상도 SAR 영상은 기존의 방법과 달리 두 SAR 영상간의 coregistration을 위해서 지형에 의한 영향을 고려하여야 한다. 따라서 최근의 고해상도 SAR 자료를 위한 coregistration은 앞서 기술한 geometric coregistration 알고리즘을 고려하여야 한다. Coregistration 결과를 이용하여 부영상을 재배열하면 두개의 SAR 자료의 위상차를 계산함으로써 Interferogram을 구할 수 있게 된다. 이러한 재배열 단계에서 최근 knab sampling window를 이용한 연구가 제안되었으며, 이는 기존의 커널에 비해 간섭위상의 오차 혹은 긴밀도에 효과적임이 밝혀졌다^{12~14)}. Phase unwrapping은 $(-\pi, \pi]$ 으로 구속화된 위상정보를 절대 위상값으로 변환하는 과정으로, SAR 영상 자료의 aliasing, speckle 잡음 및 temporal decorrelation의 문제 해결을 위한 고도의 알고리즘이 요구된다. Unwrapped 위상을 레이더 좌표계에서의 지형 고도값으로 변환하고 지리좌표계로 변환하는 과정은 세 개의 레이더방정식(도플러 방정식, 거리 방정식, 타원 방정식)의 수치해석 해를 이용하여 구한다.

기본적인 InSAR 기법을 통한 DEM 생성과 더불어 DEM의 정밀도를 향상시키는 기법에 관한 연구도 이루어져 왔는데, 여기에는 phase unwrapping 단계에서 낮은 coherence나 SNR(Signal to Noise Ratio)을 가지는 지역을 제외시키는 방법, 지상 기준점을 사용하지 않고 기선 파라미터와 정밀도가 낮은 DEM을 사용하는

방법, 그리고 InSAR DEM의 layover나 shadowing, temporal decorrelation 등에 의해 오차가 생기는 지역에 대해 SPOT 스테레오 영상을 적용한 방법 등이 있다. 이중에 정밀도가 낮은 DEM을 사용하는 방법이 널리 적용되고 있으며, 이는 뒤에 기술할 2-pass DInSAR 기술을 적용한다. 이는 원래 변위 발생 전후에 얻어진 두 개의 SAR 자료와 기존 DEM을 이용하여 지표변위를 추출하기 위한 기술이다. 하지만 변위 발생과 무관한 간섭쌍을 이용할 경우, 이때 사용되는 DEM 오차에 의한 위상이 differential interferogram에 남게 되며, 따라서 이 잔여 위상을 이용하여 정밀도가 낮은 DEM의 고도 오차를 보정함으로써 DEM의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

또한, 대기권 신호 지연에 따른 영향을 효과적으로 제거하기 위한 연구도 선진국을 중심으로 수행중이다. 대기효과는 불규칙한 대기 교란과 층리화된 대기 변화에 의한 위상 변화 현상 두 가지로 구분될 수 있다^[15]. 불규칙한 대기교란에 의한 대기효과를 보정하기 위한 방법으로는 다중 간섭쌍을 이용한 간섭도 평균 기법과 GPS 관측 또는 다중분광 광학 영상자료와 같은 기타 독립적인 관측수단을 이용하여 보정하는 방법에 대한 연구가 진행 중이다. 고도와 상관하여 나타나는 층리화 대기 효과는 differential interferogram을 기반으로 하여 잔여 위상과 고도와 고차다항식을 이용한 모델링 또는 대기 모델의 모델링을 통해 제거하는 방법이 사용되고 있다.

Fig. 5는 최근에 발사되던 독일의 TerraSAR-X 위성의 SpotLight 모드 자료를 이용하여 생성된 DEM과 SRTM(Shuttle Radar Topographic Mission) 3 arcsec DEM을 비교한 결과이다^[16]. 해상도가 많이 향상되었음을 확인할 수 있으며, 2009년에 TanDEM-X 위성이 발사되면 더욱 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다(Fig. 6)^[17]. 또한, TerraSAR-X 위성에서 송신을 하고 항공기에서 수신을 받는 bistatic 시스템을 2007년에 성공하기도 하였다^[18].

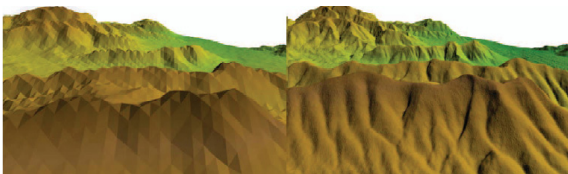


Fig. 5. A comparison between SRTM DEM(left) and TerraSAR-X(right) DEM

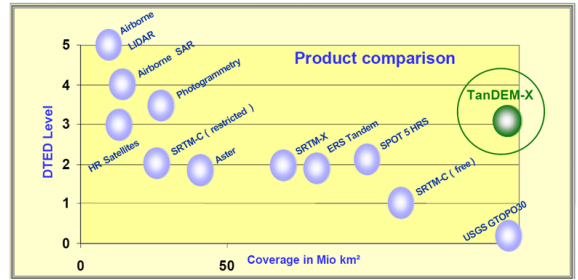


Fig. 6. DTED level and coverage of TanDEM-X

국내의 KOMPSAT-5호 역시 TerraSAR-X와 같이 X-band 시스템이며 고해상도의 영상을 획득할 수 있기 때문에 TerraSAR-X와 마찬가지로 많은 장점들을 제공할 것으로 기대한다.

나. 변화 및 변위탐지 기술

DInSAR(Differential Interferometric SAR)의 개념은 두 개의 SAR 영상으로부터 작성된 Interferogram 안에 포함되어 있는 지형, 지표변화 및 대기효과 등에 의한 잡음을 분리함으로써 지형의 변화를 cm 급으로 관측하는 기술이다. 즉, 지형의 위상을 제거함으로써 남아 있는 위상으로 관측된 시간 사이의 지표의 변위를 측정할 수 있다는 이론이다. Interferogram으로부터 지형에 의한 위상을 제거하기 위해 3가지 방법이 있으며, 이들은 2-pass, 3-pass, 그리고 4-pass DInSAR이다. 이중에 가장 널리 활용되는 2-pass는 한 쌍의 SAR 자료와 DEM을 이용하는 방법으로써 phase unwrapping이라는 복잡한 단계가 필요 없으나, 정밀한 DEM이 있어야 되며 이 DEM으로부터 모사된 SAR영상과 실제 SAR 영상간의 coregistration이 어렵다는 단점이 있다.

PSInSAR(Permanent Scatterer InSAR) 기술은 시간적으로 비교적 안정된 고정 산란체(PS)만을 영상에서 추출하여 이들의 위상 변화를 통계적으로 추적해 나감으로서 지표 변위를 얻는 기술이다^[19]. 고정 산란체는 주로 도심지의 인공 구조물, 산악지역에서는 지표에 노출된 암석이나 송전탑과 같이 표면에서만 산란이 일어나고 움직이지 않는 물체가 주를 이룬다. PSInSAR는 전통적인 DInSAR 기술과 비교해서 관심 지역에서 획득된 거의 모든 SAR 영상을 활용할 수 있으며, 대기에 의한 영향을 효과적으로 제거할 수 있고 궤도의 기하학적·시간적 제약에 대해 자유롭다. 수십여 개의 SAR 영상을 이용한 시계열 분석이 용이하기 때문에 장기간에 걸쳐 발생하는 지표 변위 관측에 유용하다(Table 2)^[20].

Table 2. Comparison between the PSInSAR and conventional DInSAR

	PSInSAR	전통적인 DInSAR
baseline	제한 없음 (ERS 경우)	아주 작음 (<200m)
대기영향	많이 줄임	크게 고려하지 못함
DEM 정밀도	100 m	baseline 의존적
SAR 영상 수	>25	≥2

또한, 최근에는 비행방향으로의 변위를 정밀 관측할 수 있는 MAI(Multiple Aperture Interferometry) 기법이 개발되어 3차원 정밀 지표변위 관측에 관한 연구가 진행되고 있다^[21]. 그리고, SBAS(Small Baseline Subset) 기술도 개발되어 관측된 지표변형을 단순히 공간적인 지표변형 관측을 뛰어 넘어 시간과 공간적으로 정밀한 지표변형 관측이 가능하게 되었다. 이는 spatial decorrelation을 극복하기 위하여 비교적 짧은 baseline을 지나는 여러 시기의 differential interferogram로부터 시계열 지표변위를 관측하는 방법이다^[22].

이러한 지표 변위를 측정할 수 있는 기술은 여러 분야에 활용이 가능하며, 그 예로 Fig. 7은 미국 스탠포드 대학에서의 지하 핵실험 탐지를 위한 개념도이다. 이는 지하에서 핵실험 수행 시 생기는 공동현상으로 인한 지표면의 변위를 측정하는 개념이다. 또한, PSInSAR를 적용한 DEM 향상 방법으로 3D city map을 생성하는 기술도 가능하다(Fig. 8)^[23].

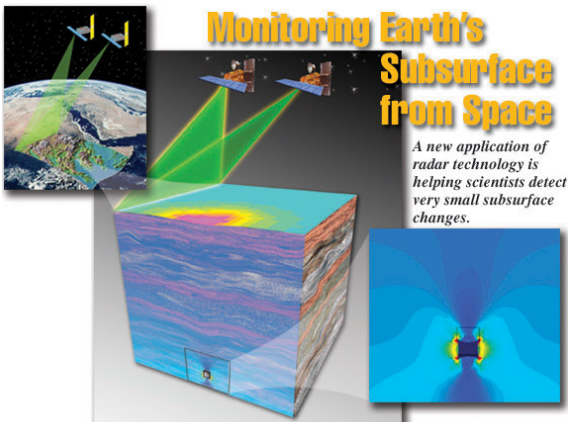


Fig. 7. Example of surface displacement detection (© Stanford University)

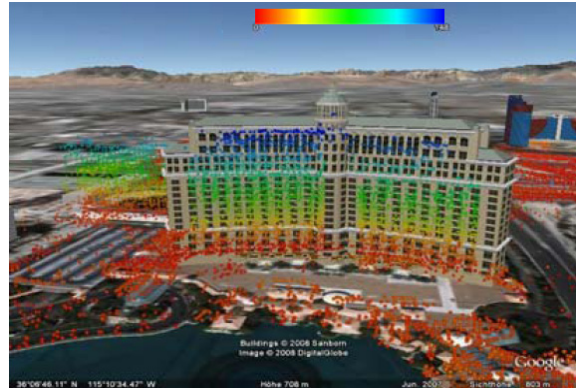


Fig. 8. Example for the 3D location precision of a city DEM

한편, 지표면의 미세 변화를 탐지할 수 있는 CCD (Coherent Change Detection)는 두 영상의 긴밀도를 나타내는 coherence 값을 이용하는 기술이다. 이는 움직임이 없고 표면 산란만을 일으키는 표면에서는 매우 높은 coherence 값을 가지게 되는 반면 움직임이 많고 체적 산란을 일으키는 물체는 낮은 긴밀도를 갖게 되는 특징을 이용한 것이다.

다. POLSAR 기술

POLSAR(Polarimetric SAR)는 전자기파의 편광 현상을 이용하여 산란체의 특성을 보다 자세하게 알아내고 분류해 내는 기술이다. HH, HV, VH, VV의 네 가지 편광 조합의 신호는 산란 물질의 특성과 상태에 따라 매우 민감하게 반응하기 때문에 특정 물체의 인식과 구별에 있어 매우 효율적인 방법이다. 따라서 POLSAR 기술은 도심, 산림 및 바다 지역의 특징을 효율적으로 알 수 있다.

또한, 최근의 POLInSAR(Polarimetric InSAR) 기술은 full-polarization을 가지는 두 영상이 InSAR가 가능한 기선과 시간차를 두고 얻어졌을 경우 산란 행렬 및 산란 벡터의 공분산 행렬 등을 이용하여 적절한 연산을 통해 최적의 물리적 변수를 추출해내는 기술이다. 예를 들어 산림의 경우 나무의 높이, 지표의 고도, 식생의 밀도에 따른 체적 산란의 정도, 또한 각 편광별로 표면산란과 체적산란의 비율 등을 구할 수 있으며, 이를 물리적 역산을 통해 얻어낼 수 있다^[9]. POLInSAR는 현재 개발 초기에 있는 기술이다. 위와 같은 POLSAR와 POLInSAR 기술은 목표물 탐지, 작물 모니터링, 산림 훼손 감시, 지표 피복 분류, 토양 수분,

해빙, 유류 오염 등 SAR 활용 전반에 걸쳐 이용 가능하다.

라. 3차원 이미징 기술

SAR Tomography는 여러 장의 SAR를 이용하여 체적 산란을 일으키는 물체의 입체적 단면을 얻는 기술이다^[24]. 기존의 SAR 활용 기술이 물체의 높이를 추출하는 것에 많은 관심이 있는 반면에, 이는 높이 뿐만 아니라 물체의 profile을 추출할 수 있다는 장점이 있다. 현재 3D 정보뿐만 아니라 시간에 따른 변화를 분석하는 4D tomography 기술이 선진국에서는 연구 중이지만^[25], 아직은 초기 단계에 머물고 있다.

마. 이동 표적 탐지 기술

이동 물체에 대한 탐지 기술인 GMTI(Ground Moving Target Indicator)는 도플러 변이(doppler shift)를 이용하여 지상에 이동하는 물체를 탐지하는 기술이다.

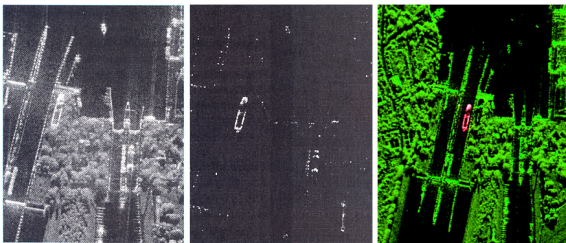


Fig. 9. Example for moving target detection(©FGAN)

항공기 GMTI 모드는 주로 군사적 목적이며, 공중조기경보통제기, 정찰기, 무인항공기 등에 장착되어 지상의 이동 물체를 탐지하는 역할을 수행한다. 항공기 GMTI에 관한 연구는 위성 GMTI에 비해 높은 해상도와 그 활용가치 때문에 상대적으로 활발히 진행되고 있다. 최근 독일 FGAN에서는 HRRLM(High Range Resolution Length Measurement)와 ISAR(Inverse SAR) 데이터를 이용하여 지상 이동물체를 탐지하는 연구와 PAMIR(Phased Array Multifunctional Imaging Radar)에서 제공하는 bistatic SAR 데이터와 고해상도 SAR 데이터를 이용하여 탐지하는 연구를 수행하였다^[26]. 위성은 항공기보다 비교적 최근에 연구가 적용중이며, 캐나다 RADARSAT-2 위성은 C-밴드 SAR를 이용하여 MODEX(Moving Object Detection EXperiment)라 불리는 GMTI 모드를 포함하고 있다^[27]. 그리고 TerraSAR-X 위성에도 GMTI 모드가 탑재되어 실험을 계속 수행중

이다. Fig. 9는 고해상도 SAR 영상을 이용한 이동 선박 탐지의 예이다.

한편, 두 개의 SAR 안테나가 아닌 하나의 SAR 안테나를 이용하는 이동물체의 탐지는 기존의 방법보다 표적 속도 성분으로 인한 도플러 모호성을 더 정확하게 계산하여 향상된 속도와 위치를 얻는 연구도 최근 제안되었다^[28].

4. 결론

군사목적의 감시 정찰 분야뿐만 아니라 민간 분야에서 널리 활용되고 있는 SAR 기술은 최근 고해상도 SAR 위성의 발사 성공으로 인하여 더욱 활용성이 증대될 것으로 예상된다. 이러한 고해상도 SAR 영상에 포함된 많은 정보를 얼마나 정밀하게 추출하여 분석하느냐가 향후 기술 개발의 목적이다. 이와 관련하여 본 논문에서는 고해상도 SAR 영상을 활용할 때 기존 중저해상도 영상과는 다른 고려사항과 활용할 수 있는 분야에 대하여 기술하였다. 향후에는 광학 영상(EO, IR, Hyperspectral images) 또는 LADAR(Laser Detection and Ranging) 자료와 같은 이종센서 데이터와의 융합에 대한 분석 및 연구가 더욱 활발히 진행될 것이다.

Reference

- [1] 정호령, 윤상호, 윤근원, “세부기술 동향조사서 (SAR 신호처리기술), 한국항공우주연구원, 국방과학연구소, 2008.
- [2] Soergel, U., Schulz, K., Thoennessen, U., Stilla, U., “Integration of 3D Data in SAR Mission Planing and Image Interpretation in Urban Areas”, Information Fusion 6, pp. 301~310, 2005.
- [3] Bamler, R., Eineder, M., “The Pyramids of Gizeh Seen by TerraSAR-X - A Prime Example for Unexpected Scattering Mechanism in SAR”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 5, No. 3, pp. 468~470, 2008.
- [4] Brenner, A. R., Roessing, L., “Radar Imaging of Urban Areas by Means of Very High-Resolution SAR and Interferometric SAR”, IEEE Transactions

- on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No. 10, pp. 2971~2982, 2008.
- [5] Nico Adam, Michael Eineder, Birgit Schättler, Nester Yague-Martinez, "First TerraSAR-X Interferogram Evaluation", Proceedings of FRINGE Workshop, ESA SP(649 SP), 2007.
- [6] Sansoti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G., "Geometrical SAR Image Registration", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 10, pp. 2861~2870, 2006.
- [7] Eineder, M., Adam, N., Bamler, R., Yague-Maritinez, N., Breit, H., "Spaceborne Spotlight SAR Interferometry With TerraSAR-X", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, No. 5, pp. 1524~1535, 2009.
- [8] Geun-Won Yoon, Sang-Wan Kim, Yong-Woong Lee, Joong-Sun Won, "Geometric Coregistraion for TerraSAR-X Interferometry", International Symposium on Remote Sensing(in CD), 2008.
- [9] 이훈열, "SAR 관련 논문 통계 분석에 의한 SAR 시스템, 기술, 활용분야 고찰", 대한원격탐사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 153~174, 2006.
- [10] Kwoh, L. K., Chang, E. C., Heng, W. C. A., Lim, H., "DTM Generation from 35-days Repeat Pass ERS-1 Interferometry", Proceedings of IGARSS, pp. 2288~2290, 1994.
- [11] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., "Crossed Orbit Interferometry : Theory and Experimental Results from SIR-B", International Journal of Remote Sensing, Vol. 9, No. 5, pp. 857~872, 1988.
- [12] Migliaccio, M. and Bruno, F., "A New Interpolation Kernel for SAR Interferometric Registration", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 5, pp. 1105~1110, 2003.
- [13] Cho, B. L., Kong, Y. K. and Kim, Y. S., "Interpolation using Optimum Nyquist filter for SAR Interferometry", Journal of Electromagnetic Waves and Applications., Vol. 19, No. 1, pp. 129~135, 2005.
- [14] Migliaccio, M., Nunziata, F., Bruno, F., Casu, F., "Knab Sampling Window for InSAR Data Interpolation", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, No. 3, pp. 397~400, 2007.
- [15] Hanssen, R., Radar Interferometry : Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 308, 2001.
- [16] Eineder, M., Adam, N., Brcic, Yague-Maritinez, N., Fritz, T., "High Bandwidth Spotlight SAR Interferometry with TerraSAR-X", Proceedings of IGARSS pp. II113~II116, 2008.
- [17] Hajnsek, I., Busche, T., Moreira, A., TanDEM-X Team, "TanDEM-X : Science Activities and Proposal Submission", Proceedings of IGARSS Scientific Presentation, 2009.
- [18] Baumgartner, S. V., Rodriguez-Cassola, M., Nottensteiner, A., Horn, R., Scheiber, R., Schwerdt, M., Steinbrecher, U., Metzger, R., Limbach, M., Mittermayer, J., Krieger, G., Moreira, A., "Bistatic Experiment Using TerraSAR-X and DLR's New SAR System", 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar(in CD), 2008.
- [19] Ferretti. A., Prati. C., Rocca. F., "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 8~20, 2001.
- [20] Ferretti. A., Prati. C., Rocca. F., "Nonlinear Subsidence Rate Estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, pp. 2202~2212, 2000.
- [21] Bechor, N. B. D., Zebker, H. A., "Measuring Two-Dimensional Movements using a Single InSAR Pair", Geophysical Research Letters, Vol. 33, L16311, 2006.
- [22] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansoti, E., "A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferogram", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 2375~2383, 2002.
- [23] Adam, N., Zhu, X., Bamler, R., "Coherent Stacking with TerraSAR-X Imagery in Urban Area", IEEE Urban Remote Sensing Joint Event, pp. 1~6, 2009.
- [24] Griffiths, H. D., Baker, C. J., Advances in Sensing with Security Applications, Springer Netherlands, pp. 171~187, 2006.

- [25] Fornaro. G., Reale. D., Serafino. F., “Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, No. 1, pp. 224~237, 2009.
- [26] Brenner A. R., Ender, J. H. G., “Demonstration of Advanced Reconnaissance Techniques with the Airborne SAR/GMTI Sensor PAMIR”, IEEE Radar Sonar Navig., Vol. 153, No. 2, pp. 152~162, 2006.
- [27] Chiu, S., Livingstone, C., Sikanneta, I., Gierull, C., Beaulne, P., “Radarsat-2 Moving Object Detection Experiment(MODEX)”, Proceedings of IGARSS pp. 13~16, 2008.
- [28] Dias, J. M. B., Marques, P. A. C., “Multiple Moving Target Detection and Trajectory Estimation Using a Single SAR Sensor”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 2, pp. 604~624, 2003.