

논문

SAR(Synthetic Aperture Radar) 위성 개발현황 및 향후 HRWS(High Resolution Wide Swath) SAR 위성 개발전략

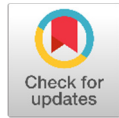
고웅대[†], 서인호, 이주영, 정현재

국방과학연구소

Current Trends of the Synthetic Aperture Radar (SAR) Satellite Development and Future Strategy for the High Resolution Wide Swath (HRWS) SAR Satellite Development

Ungdai Ko[†], Inho Seo, Juyoung Lee, Hyunjae Jeong

Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea



Received: October 12, 2021
Revised: November 2, 2021
Accepted: November 5, 2021

[†]Corresponding author :

Ungdai Ko
Tel : +82-42-821-0788
E-mail : udko@add.re.kr

Copyright © 2021 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Ungdai Ko
<https://orcid.org/0000-0002-0808-3598>
Inho Seo
<https://orcid.org/0000-0003-3623-5138>
Juyoung Lee
<https://orcid.org/0000-0001-9329-464X>
Hyunjae Jeong
<https://orcid.org/0000-0002-5726-1602>

요약

본 논문은 SAR 위성 기술의 현황을 조사하여 향후 우리나라 HRWS SAR (High Resolution Wide Swath Synthetic Aperture Radar) 위성을 개발하기 위한 전략을 제안하기 위해 만들어졌다. 현황조사를 통해, 최신 SAR 기술 동향은 SAR 위성 영상을 보다 적극적으로 활용하기 위해 DBF(Digital Beam-Forming), SCORE(SCan-On-REceive), DPCA(Displaced Phase Center Antenna), 간섭계, 그리고 편파 기술을 사용하는 것이라는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 최신 SAR 기술 동향 및 해외 HRWS SAR 개발 사례를 기반으로, 수년 내로 발사가 예정된 KOMPSAT-6(KOrea Multi-Purpose SATellite-6)를 사용하여 DPCA 및 SCORE 기술을 개발하고, 결국에는 전지구를 일주일 간격으로 관측할 수 있는 HRWS SAR 위성을 개발하는 것을 향후 우리나라 HRWS SAR 위성 개발을 위한 전략으로 제안하였다.

Abstract

This paper is made to suggest a future strategy for the Korean High Resolution Wide Swath Synthetic Aperture Radar (HRWS SAR) satellite development by surveying the current trends for the SAR satellite technologies. From the survey, the latest SAR technology trends are revealed of using Digital Beam-Forming (DBF), SCan-On-Receive (SCORE), Displaced Phase Center Antenna (DPCA), interferometry, and polarimetry for exploiting the SAR imagery. Based on the latest SAR technology trends and the foreign HRWS SAR development cases, the strategy for the future HRWS Korean SAR satellite development is suggested to develop the DPCA and SCORE technologies by using the KOrea Multi-Purpose SATellite-6 (KOMPSAT-6) which is going to launch in a few years, and consequently to develop the HRWS SAR satellites which can monitor the whole Earth at weekly intervals.

핵심어 : SAR(Synthetic Aperture Radar) 위성, 광역 고해상 SAR, 다중입출력 SAR, 다중채널 SAR, SAR 간섭계

Keywords : Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite, High Resolution Wide Swath Synthetic Aperture Radar (HRWS SAR), Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) SAR, multichannel SAR, SAR interferometry

1. 서론

1978년 최초의 SAR(Synthetic Aperture Radar, 합성개구레이다) 위성인 SEASAT이 발사된 후 지금까지 약 40년 동안 무수히 많은 SAR 위성이 발사되어 지구를 돌고 있으며, 우리나라도 2013년 다목적실용위성 5호를 발사하여 현재 운용 중에 있다. SAR 위성은 태양광이 필요한 EO(electro-optical, 전자광학) 위성과는 달리 레이더 파를 사용하여 낮과 밤 구분 없이 운용이 가능하다. 그리고 SAR 신호의 특성을 이용하여 관심지역에 대한 다양한 분석이 가능하다.

본 논문에서는 SAR 위성 개발 현황을 파악하고 이를 바탕으로 향후 우리나라 HRWS(High Resolution Wide Swath, 고해상광역관측폭) SAR 위성의 개발전략을 제안하였다. 이를 위해 2절에서 위성용 SAR 탑재체 기술 개발 동향을 기술하였으며, 2.1절 SAR 탑재체 위성 개발 동향에서는 현재 SAR 탑재체를 탑재하여 성공적으로 운용되고 있는 대표적인 SAR 위성들을 기술하였다. 그리고 2.2절 SAR 탑재체 기술 개발 동향에서는 2.2.1절에서 현재 활용되고 있는 보편적 SAR 운용 기술을 소개하였고, 2.2.2절에서 최신 SAR 탑재체 기술 개발 동향을 소개하였다. 2.3절 SAR 탑재체 영상 활용 기술 동향에서는 기존의 SAR 영상 활용 기술과 새롭게 연구되고 있는 주요 SAR 영상 활용 기법에 대해 언급하였다. 3절에서는 이상 언급된 SAR 탑재체 기술 개발 동향과 해외 HRWS SAR 위성 개발 사례를 바탕으로 향후 우리나라 HRWS SAR 위성 개발전략을 제안하였다.

2. 위성용 SAR(Synthetic Aperture Radar) 탑재체 기술 개발 동향

2.1 SAR 탑재체 위성 개발 동향

2.1.1 RADARSAT-II

RADARSAT-II는 캐나다 CSA(Canadian Space Agency)와 MDA(MacDonald Dettwiler Associates of Richmond, BC)가 함께 개발한 민간 위성이다. RADARSAT-II는 RADARSAT-I의 후속위성으로 2007년 12월 발사되었으며 1대가 운용 중이다[1]. Fig. 1a는 RADARSAT-II의 형상을 보여준다. 주요 특성은 Table 1과 같다.

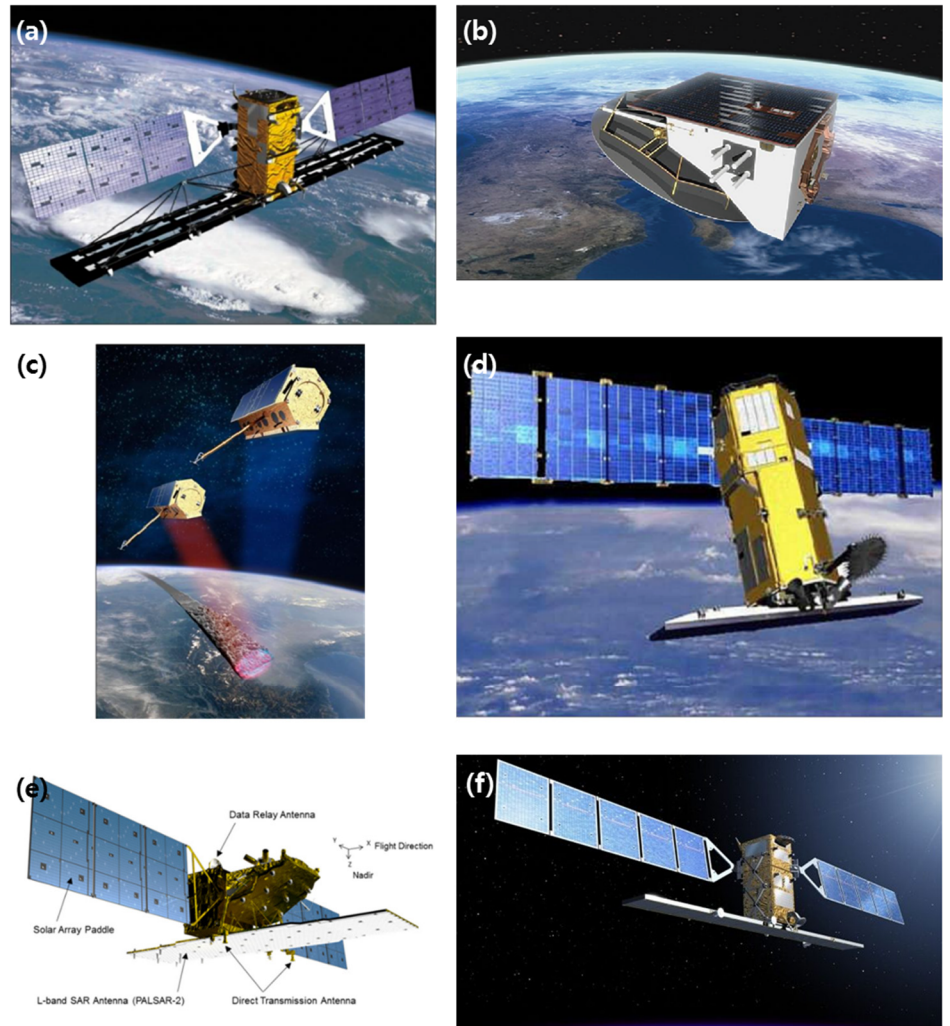


Fig. 1. SAR payload satellites. (a) RADARSAT-II [1], (b) SAR-Lupe [3], (c) TerraSAR/TanDEM [4], (d) KOMPSAT-5 [5], (e) ALOS-2 [6], (f) COSMO-SkyMed 2nd Generation [7]. SAR, Synthetic Aperture Radar; KOMPSAT-5, KOREA Multi-Purpose SATELLITE-5; ALOS-2, Advanced Land Observing Satellite-2.

Table 1. RADARSAT-II characteristics [1,2]

Item	Characteristic
Resolution	3–100 m
Polarimetry	Quadruple
Orbit	Sun-synchronous
Altitude	798 km
Orbit inclination	98.6°
Frequency band	C-band
Center frequency	5.405 GHz
Antenna	Active phase array antenna

2.1.2 SAR-Lupe

SAR-Lupe는 독일 OHB-System AG가 개발한 독일 최초의 군사위성이다. SAR-Lupe는 2006년 12월 발사된 1호를 시작으로 2008년 7월 발사된 5호까지 총 5대가 군집으로 운용된다[3]. Fig. 1b는 SAR-Lupe의 형상을 보여준다. 주요 특성은 Table 2와 같다.

2.1.3 TanDEM-X (TDX)

TDX(TanDEM-X: TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement)는 독일 DLR(German Aerospace Center), EADS GmbH, 그리고 Infoterra GmbH가 함께 개발한 민간위성이다. TDX는 TSX(TerraSAR-X)의 후속위성으로 2010년 6월에 발사되었으며 1대가 운용 중이다[4]. TDX는 고정밀 DEM(digital elevation model, 수치표고모델)을 확보하기 위해 필요한 간섭영상(interferometric image) 촬영이 가능하도록 TSX 근처에서 비행하며 임무를 수행한다. Fig. 1c는 TDX와 TSX의 형상을 보여준다. 주요 특성은 Table 3과 같다.

Table 2. SAR-Lupe characteristics [2,3]

Item	Characteristic
Resolution	0.5 m, 1 m
Polarimetry	Single
Orbit	Polar
Altitude	500 km
Orbit inclination	98.2°
Frequency band	X-band
Center frequency	9.65 GHz
Antenna	Reflector

SAR, Synthetic Aperture Radar.

Table 3. TDX characteristics [2,4]

Item	Characteristic
Resolution	1, 3, 16 m
Polarimetry	Quadruple
Orbit	Sun-synchronous
Altitude	514 km
Orbit inclination	97.44°
Frequency band	X-band
Center frequency	9.65 GHz
Antenna	Active phase array antenna

TDX, TanDEM-X.

2.1.4 KOREA Multi-Purpose SATellite-5 (KOMPSAT-5)

KOMPSAT-5(KOREA Multi-Purpose SATellite-5)는 우리나라 KARI(Korea Aerospace Research Institute)가 개발한 위성이다. KOMPSAT-5는 2013년 8월에 발사되었으며, 1대가 운용 중이다[5]. Fig. 1d는 KOMPSAT-5의 형상을 보여준다. 주요 특성은 Table 4와 같다.

2.1.5 Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2)

ALOS-2(Advanced Land Observing Satellite-2)는 일본 JAXA(Japan Aerospace and Exploration Agency)가 개발한 위성이다. ALOS-2는 ALOS-1의 후속위성으로 2014년 5월 발사되었으며, 1대가 운용 중이다[6]. Fig. 1e은 ALOS-2의 형상을 보여준다. 주요 특성은 Table 5와 같다.

2.1.6 COSMO-SkyMed Second Generation Synthetic Aperture Radar (CSG-SAR)

CSG-SAR(COSMO-SkyMed Second Generation Synthetic Aperture Radar)는 이탈리아

Table 4. KOMPSAT-5 characteristics [5]

Item	Characteristic
Resolution	1, 3, 20 m
Polarimetry	Single
Orbit	Sun-synchronous
Altitude	550 km
Orbit inclination	97.6°
Frequency band	X-band
Center frequency	9.66 GHz
Antenna	Active phase array antenna

KOMPSAT-5, KOREA Multi-Purpose SATellite-5.

Table 5. ALOS-2 characteristics [6]

Item	Characteristic
Resolution	3, 6, 10, 100 m
Polarimetry	Quadruple
Orbit	Sun-synchronous
Altitude	628 km
Orbit inclination	97.9°
Frequency band	L-band
Center frequency	1,236.5 / 1,257.5 / 1,278.5 MHz (selectable)
Antenna	Active phase array antenna

ALOS-2, Advanced Land Observing Satellite-2.

ASI(Italian Space Agency)에서 요구조건을 제공하고, I-MoD(Italian Ministry of Defense)에서 자금을 받아 개발된 민군 겸용 위성이다. CSG-SAR는 CSK(COSMO-SkyMed first Generation)의 후속위성으로 2대가 계획되었으며, 1호기는 2019년 12월 발사되었다[7]. Fig. 1f는 CSG-SAR의 형상을 보여준다. 주요 특성은 Table 6과 같다.

2.2 SAR 탑재체 기술 개발 동향

2.2.1 일반 SAR 탑재체 기술

일반적으로 SAR 시스템은 안테나 방사 패턴을 운용 모드에 따라 조절하여 다양한 영상 모드를 구현한다. SAR 탑재체에 적용되는 위상 배열 안테나의 경우, 안테나를 소형 개구(sub-aperture)들로 나누고, 송수신 모듈(TRM, transmit/receive module)의 위상과 크기를 조절하여 방사 패턴을 합성할 수 있다[8].

2.2.1.1 Stripmap

SAR 시스템의 가장 기초적인 영상모드는 stripmap 모드이다. Stripmap 모드는 안테나 패턴이 하나의 관측폭으로 고정되어 있어서, Fig. 2a와 같이 연속된 strip 영상을 촬영할 수 있다. Stripmap 모드의 해상도는 안테나의 진행방향(azimuth)을 한 축으로 하고 안테나의 진행 방향에 수직이 되는 안테나 고도각 방향(slant-range)을 다른 한 축으로 하는 2차원으로 표현될 수 있다. 안테나 고도각 방향의 경사거리(slant-range) 해상도 d_r 은 아래 식 (1)과 같이 표현된다[8-11].

$$d_r = c_0/2B_r \quad (1)$$

여기서 c_0 는 빛의 속도를 나타내며, B_r 은 주파수 대역폭을 나타낸다. 그리고 안테나 방위각(azimuth)의 해상도 δ_a 는 아래 식 (2)와 같이 표현된다[8-11].

Table 6. CSG-SAR characteristics [7]

Item	Characteristic
Resolution	0.35-40 m
Polarimetry	Quadruple
Orbit	Sun-synchronous
Altitude	619.6 km
Orbit inclination	97.86°
Frequency band	X-band
Center frequency	9.6 GHz
Antenna	Active phase array antenna

CSG-SAR, COSMO-SkyMed Second Generation Synthetic Aperture Radar.

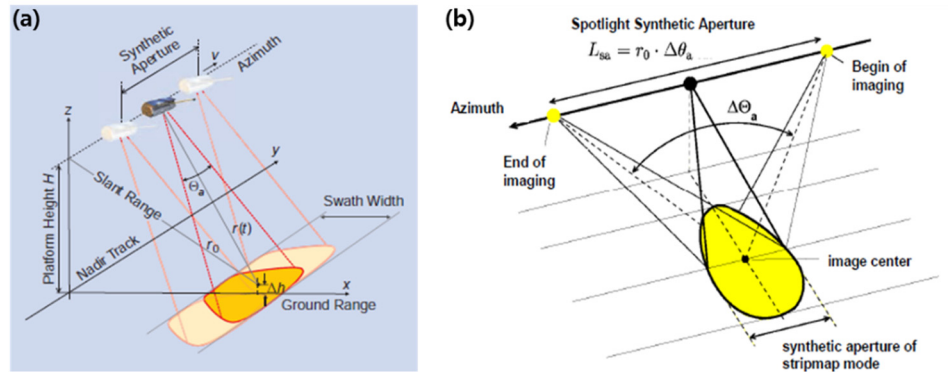


Fig. 2. General principles of SAR imaging. (a) Stripmap mode [8], (b) Spotlight mode [12].

$$\delta_a = \frac{d_a}{2} \tag{2}$$

여기서 d_a 는 안테나 길이를 나타낸다.

2.2.1.2 Spotlight

만약 방위각 방향(안테나 진행방향) 해상도를 높이고 싶다면 spotlight 모드가 사용된다. Spotlight 모드에서는 어느 한 지역을 촬영할 때 Fig. 2b에서처럼 안테나 패턴이, 해당 지역 안에 위치한 고정된 한 점을 계속 바라보도록 방향을 바꾸게 된다. 해당 지역에 대해 길어진 촬영시간은 합성개구 길이를 증가시키고, 결국 더 좋은 해상도를 얻게 된다. 방위각 방향(안테나 진행방향) 해상도 δ_a 는 아래 식 (3)과 같다.

$$\delta_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_a} \tag{3}$$

여기서 λ 는 파장을 나타내고, $\Delta\theta_a$ 는 촬영 시작에서의 빔조향 방향과 촬영 끝에서의 빔조향 방향 사이의 각을 나타낸다[8-11].

2.2.1.3 ScanSAR

만약 stripmap보다 더 넓은 관측폭이 필요하다면, scanSAR 모드가 사용될 수 있다. ScanSAR 모드의 고도각 방향 안테나 패턴은 Fig. 3a와 같이 다중(multiple)으로 나누어진 소형 관측폭(sub-swath)에 해당하는 고도각에 맞추어, 방향을 바꾸게 된다. 이 때문에, 각 소형 관측폭들은 stripmap 경우보다 짧은 시간 동안 촬영된다. 적절한 처리가 끝난 뒤 scanSAR 모드는 넓은 관측폭의 SAR 영상을 만들게 된다. 하지만 stripmap 모드에 비해 방위각 방향 해상도는 낮아진다[8,13].

2.2.1.4 Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS)

TOPS(Terrain Observation by Progressive Scans) 모드는 stripmap 모드의 일종이며, 안테나 패턴을 고도각 방향으로만 변환하는 scanSAR 모드와는 다르게, Fig. 3b와 같이 안테나 패턴을 고도각 방향뿐 아니라, 방위각 방향으로도 변환시켜 영상을 촬영한다. TOPS 모드는

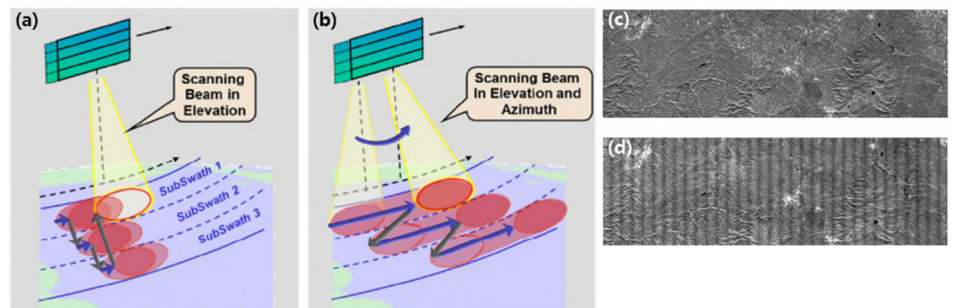


Fig. 3. General technologies of SAR payload. (a) ScanSAR mode [13], (b) TOPS mode [13], (c) TOPS mode image [14], (d) ScanSAR mode image(no scalloping correction applied) [14]. TOPS, Terrain Observation by Progressive Scans.

Fig. 3c와 3d에서 볼 수 있는 것처럼 scanSAR 모드 영상에서 세로 방향으로 나타날 수 있는 scalloping 현상을 제거하여 영상품질을 향상시킬 수 있다[8,13,14].

2.2.2 최신 SAR 탑재체 기술 개발 동향

앞에서 보편적 SAR 운용 기술에 대해 살펴보았고, 다음으로 최신 SAR 탑재체 기술 동향을 정리하였다. 현재 multistatic, DBF(Digital Beam-Forming, 디지털빔형성)를 기반으로 한 HRWS 기술 등이 주로 연구되고 있으며, 해당 기술은 가까운 미래에 실용화 될 것으로 예상된다[8,11].

2.2.2.1 Bistatic and multistatic SAR

하나의 안테나를 이용하여 송신과 수신을 모두 수행하는 기존의 monostatic SAR 시스템과 비교하여, bistatic SAR는 Fig. 4a와 같이, 송신기와 수신기가 공간적으로 떨어져 있는 레이더 시스템을 의미하며, multistatic SAR는 하나의 수신기를 가지는 bistatic SAR와는 다르게 Fig. 4b와 같이 다중(multiple) 수신기를 가진 레이더 시스템을 의미한다[15]. 기존의 monostatic 시스템과 비교하여 송신기와 수신기들을 따로 분리하는 경우, 동시에 여러 각도로 지상영상을 획득할 수 있는 고유한 관찰 기하가 가능하게 된다[11,15].

수신기 수가 많을수록 더 많은 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 관련 위성을 재구성하거나 그들의 위치를 미세 조정하는 방법으로 방사 측정 및 간섭 측정 모드에서 시스템 감도를 최적화 할 수 있다[11]. 이러한 특징들로 인해 bistatic과 multistatic SAR 시스템은 지구탐사에 많이 사용되고 있다. 관련된 지구탐사의 예를 들면 지형 매핑, 얼음의 질량과 부피 변화 관찰, 식물 구조 측정 및 3-D 변화 관측 등이 있다[11,15].

2.2.2.2 High resolution wide swath synthetic aperture radar (HRWS SAR)

HRWS SAR 시스템은, Fig. 4c와 같이, 여러 개의 소형 개구(sub-aperture)로 나누어진 큰 수신 안테나를 가지고 있다. 각 소형 개구들은 개별적인 수신 채널에 연결되어 있다. 고도각 방향의 다중(multiple) 소형 개구들은 돌아오는 레이더 파면(wavefront) 방향에 맞춰 폭이 좁은 고도각 빔의 방향을 실시간으로 바꾸는데 사용된다[8,11,16].

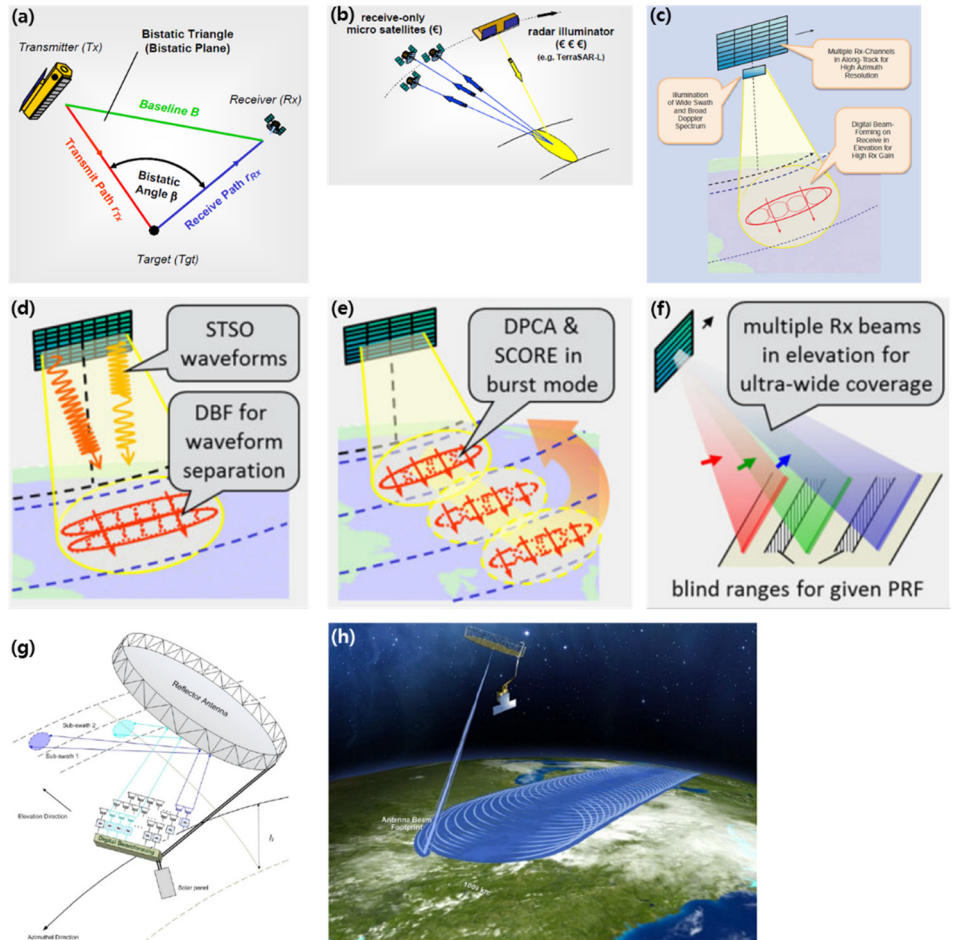


Fig. 4. Latest technologies of SAR payload. (a) Bistatic flight [15], (b) Multistatic flight [15], (c) HRWS SAR [8], (d) MIMO SAR [11], (e) Multichannel ScanSAR [11], (f) Single-channel SAR with multiple elevation beams [11], (g) Digital beam forming with reflector antenna [17], (h) SMAP mission [19]. HRWS SAR, High Resolution Wide Swath Synthetic Aperture Radar; MIMO, Multiple-Input Multiple-Output; SMAP, Soil Moisture Active and Passive.

이와 같은 기술은 SCORE(SCan-On-Receive, 수신스캔) 기술이라 불리며, 관측폭을 희생하지 않으면서 민감도와 방사해상도를 높이는데 적합하다. 또한, 돌아오는 레이더 파면을 방위각 방향으로 서로 떨어져 있는 다중 소형 개구들이 샘플링하는데, 이런 추가적인 방위각 방향 샘플링은 방위각 방향 모호성(ambiguity)을 증가시키지 않고, 방위각 방향 해상도를 높일 수 있는 넓은 도플러 대역의 영상을 얻을 수 있게 한다[8,11,16].

2.2.2.3 Multiple-input multiple-output synthetic aperture radar (MIMO SAR)

다중채널 stripmap 모드를 가진 HRWS은 방위각 방향 해상도를 1 m 이하로 줄일 수는 있으나, 150 km보다 큰 관측폭을 위해선 15 m 이상의 다소 긴 안테나가 필요하기 때문에 넓은 관측폭 매핑에는 부적절하다[11]. 관측폭을 확장하기 위한 해결방법은 Fig. 4d에 나와 있는 것처럼 두 개의 송신기를 동시에 사용하는 것이다. 이러한 MIMO(Multiple-Input Multiple-

Output, 다중입력다중출력) SAR는 전체 안테나 길이를 일정하게 유지하면서 관측폭을 두 배로 늘릴 수 있다[11].

2.2.2.4 Multichannel ScanSAR

Multichannel scanSAR는 Fig. 4e와 같이, DPCA(Displaced Phase Center Antenna, 분산 배치위상중심안테나) 기술을 사용하여 많은 수의 방위각 방향 개구로 샘플링된 넓은 도플러 스펙트럼을 활용하고, SCORE 기술을 사용하여 고도각 빔의 방향을 실시간으로 변경하여 높은 해상도와 넓은 관측폭을 얻는 기술이다. 하지만 대역폭 변화, 큰 스캔트각 변화, 그리고 서로 다른 burst PRF(Pulse Repetition Frequency, 펄스반복주파수)와 같은 어려움은 아직 해결해야 할 과제이다[8,11,16,17].

2.2.2.5 Single-channel SAR with multiple elevation beams

Single-channel SAR with multiple elevation beams은 multichannel scanSAR의 대안 중 하나이다[17]. Fig. 4f에서 볼 수 있듯이, 하나의 광폭 빔 조사기로 송신된 서로 다른 펄스의 반사파들이 서로 다른 방향으로 동시에 도착할 때, 각각의 반사파를 따로 수신할 수 있도록 다중의 좁은 고도각 빔들이 만들어진다. 이 기술은 안테나 크기를 크게 하거나 burst 모드를 사용할 필요 없이 촬영지역을 증가시킬 수 있다[8,11,17,18].

하지만, 해결해야 할 2가지 어려움이 있다. 첫 번째는, 서로 다른 송신 펄스로부터 만들어지는 반사파들이 동시에 수신될 때, 서로 다른 반사파임에도 불구하고 같은 반사파로 오인되면서 생기는 고도각 방향 모호성(range ambiguity)을 최소화하는 것이다. 그리고 두 번째는 레이더가 전파를 송신하는 동안에는 수신을 하지 못하기 때문에 발생하는 관측 불가능 거리(blind range)이다. 하지만, 첫 번째 어려움은 고도각 방향으로 좁은 폭의 빔을 만들 수 있는 안테나로 해결할 수 있고, 두 번째 어려움은 서로 떨어져 있는 두 개의 위성을 사용하거나 관측 불가능 거리가 관측폭을 가로질러 이동할 수 있도록 천천히 변하는 PRF를 사용하여 해결할 수 있다[8,11,17].

2.2.2.6 Digital beam forming with reflector antenna

안테나 패턴이 고정되는 반사판 안테나의 단점을 해결하고, 다양한 안테나 패턴을 디지털 방식으로 생성 가능한 DBF 기술을 적용한 것이 DBF를 적용한 반사판 안테나 기술이다. Fig. 4g와 같이, 파라볼릭 반사판형 안테나는 돌아오는 레이더 파를 하나 또는 몇 개의 피드 요소(feed element)에서 포커싱을 수행한다. 반사파는 고도각이 증가하는 방향으로 도착하기 때문에, 도착하는 반사파 방향에 맞춰 피드 요소를 차례로 읽기만 하면 된다[8,17]. 직접 방사 어레이와 비교해서, 각 순간마다 몇 개의 피드 신호들을 합치기만 하면 되기 때문에, 실시간 빔조향을 위한 계산시간이 많이 줄어든다. 이러한 안테나는 우주 열변형에 둔감한 진보된 경량 그래파이트 에폭시 복합재료로 만들어진다[8,17].

2.2.2.7 Rotating reflector antenna

Rotating reflector antenna 개념은 SMAP(Soil Moisture Active and Passive) 프로젝트에서 NASA/JPL에 의해 소개되었다. Fig. 4h와 같이, 이 기술은 DBF 기술을 사용하지 않으며,

하나의 피드가 약 13-14.6 rpm으로 회전하는 안테나를 지향하도록 한다[17,19].

포트프린트는 약 40 km의 관측폭을 가진다. 하지만 처리 알고리즘의 도움을 받는 경우, 위성 진행 방향의 회전은 1,000 km의 관측폭이 가능하게 된다[17,19]. 이 기술은 전 지구를 기존의 방법보다 4배 빠르게 촬영할 수 있게 한다. 그러나 안테나를 회전시키는 것은 어려운 기술이다. 회전이 시작되면 위성은 주어진 궤도에서 벗어나지 않도록 위성의 자세가 제어되어야 한다[17,19].

2.3 SAR 탑재체 영상 활용 기술 동향

2.3.1 SAR interferometry

SAR 간섭계(interferometry) 기술은 지표형상, 지표변위 및 침하, 빙하 이동과 같은 중요한 지구 물리학적 매개 변수를 매우 정확하게 측정할 수 있는 강력하고 잘 확립된 원격탐지 기술이다[20,21]. SAR 간섭계 기술의 핵심 아이디어는 주어진 촬영지역에 대해 약간 다른 위치 또는 서로 다른 시간에서 획득한 두 개 이상의 레이더 영상에 포함된 위상을 비교하는 것이다.

각 SAR 영상의 위상에는 정확한 레이더 파장 정보가 포함되어 있기 때문에, 센티미터 또는 밀리미터 정확도로 레이더 파 경로 길이 차이를 감지하고 측정할 수 있다[8,11]. SAR 간섭계 기술의 기본적인 측정값으로 interferogram이 있다[8]. 이 측정값은 어떤 한 지역에 해당하는 두 장의 SAR 영상으로 만들어지며 두 영상 사이에서의 위상 값 차이를 나타낸다. 다른 말로 하면 지표변위의 디지털 표현이라고 할 수 있다[22]. Fig. 5a는 interferogram으로 만들어진 DEM이다.

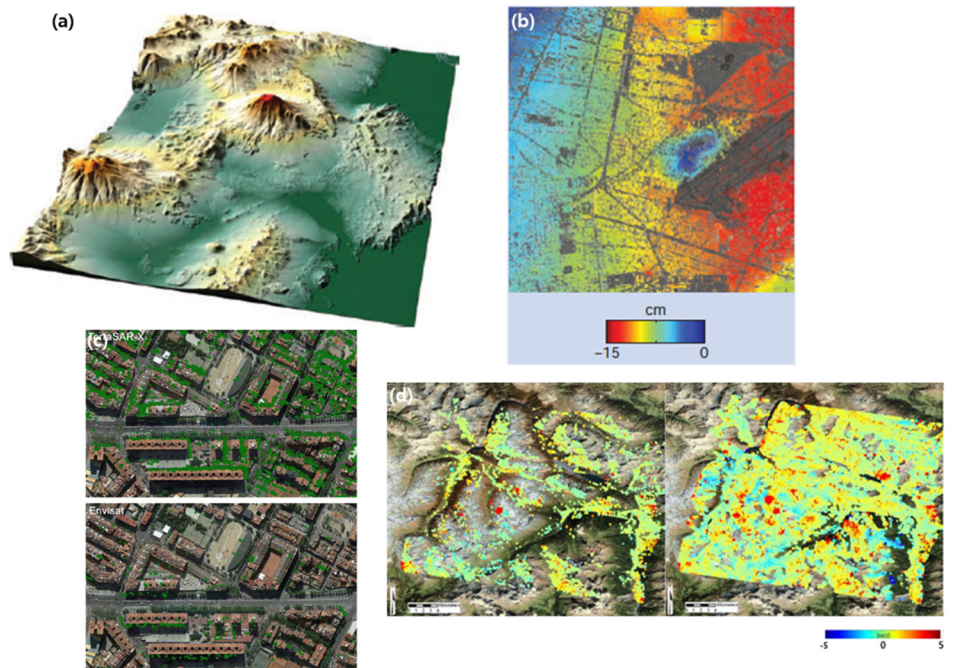


Fig. 5. SAR interferometry. (a) DEM from Interferogram [8], (b) DInSAR at Mexico City [8], (c) PS [24], (d) PS vs SqueeSAR [25]. SAR, Synthetic Aperture Radar; DEM, Digital Elevation Model; DInSAR, Differential Interferometry SAR; PS, Permanent Scatterer.

하지만, interferogram을 사용하면 LOS(Line Of Sight, 조준선) 방향의 정확한 지표변위 값을 얻을 수 있을 것이라는 기대와는 다르게, 어떤 한 위성이 서로 다른 시간에 같은 장소를 촬영하면, 촬영 때마다 약간씩 다른 LOS 방향으로 촬영하게 되기 때문에, 지형학적 왜곡에 영향을 받게 된다[21,22]. 이런 지형학적 왜곡을 최소화하기 위해 DEM을 사용하여 지형학적 왜곡을 보정한 differential interferogram을 만들어 사용하는데, 이 기술은 DInSAR(Differential Interferometry SAR)라고 불린다[21,22]. Fig. 5b은 DInSAR로 얻은 Mexico city의 지표변위 그림이다.

2.3.1.1 Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR)

PSInSAR(Permanent Scatterer Interferometry SAR, 고정산란체간섭 SAR)는 DInSAR 중 하나로 지표변위를 밀리미터 정확도로 구할 수 있는 기술이다. 이 기술은 PS(Permanent Scatterer, 고정산란체)를 사용하는데, 이는 영상에서 시간의 변화에도 안정된 크기를 보여주는 하나의 픽셀로 나타나며, 보통 빌딩이나 바위와 같은 점 같은 표적이 이에 해당한다 [8,22-24]. Fig. 5c에서의 초록색 점은 TerraSAR-X와 ENVISAT 영상으로 구한 PS를 나타낸다[24].

2.3.1.2 SqueeSAR

PSInSAR는 인공 구조물을 PS로 선별하여 도심지역 외에는 그 밀도가 저하된다[23,25]. 이를 극복하기 위해서 개발된 squeeSAR는 PS 외에도 서로 유사한 레이다 반사특성을 가지는 인접 픽셀들, 즉 DS(Distributed Scatterer, 분포산란체)를 이용하여 높은 품질의 지구 물리적인 특성을 고밀도로 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다[23,25]. SqueeSAR란 이름은 최적의 결과를 얻기 위해 필요한 정보를 “squeezing“하는 데서 유래한다[25]. Fig. 5d는 PS 기술과 squeeSAR 기술로 얻을 수 있는 측정점을 비교한 그림이다.

2.3.2 Synthetic aperture radar-ground moving target indication (SAR-GMTI)

SAR-GMTI(Ground Moving Target Indication, 지상이동표적탐지)는 SAR 위성의 데이터를 사용하여 지상의 이동물체를 관측하는 기술이다. SAR 탑재체 위성은 EO 탑재체 위성과는 다르게 밤낮 구분 없이 영상을 획득할 수 있기 때문에, 지상 이동물체를 지속적으로 관측하는데 유리하다. 하지만 SAR는 EO와는 다르게 표적이 되는 이동물체의 속도를 정확히 추정할 수 있어야 이동물체의 정확한 위치를 영상에 표현할 수 있다[26,27]. 현재 이를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. Fig. 6a에서 색깔 있는 삼각형은 이동물체를 나타낸다.

최근, HRWS 기술로 얻을 수 있는 낮은 클러터 특성을 가진 SAR 영상을 사용하여 GMTI의 이동물체 탐지 가능성을 높이려는 연구가 활발히 진행 중에 있다[28,29].

2.3.3 SAR polarimetry

SAR polarimetry는 인공 및 자연 산란체에 대한 편파 특성 측정을 기반으로 토지, 눈, 얼음, 해양 및 도시 관련 응용 분야에서 정성적 및 정량적인 물리학적 정보를 얻는데 널리 사용되는 기술이다[8]. 전체 산란 행렬을 측정하면 산란체의 모양, 방향 및 유전(dielectric) 특성을 정밀하게 관찰할 수 있으며, 해상도 셀 내부에서 발생하는 산란 메커니즘을 식별하거나 분

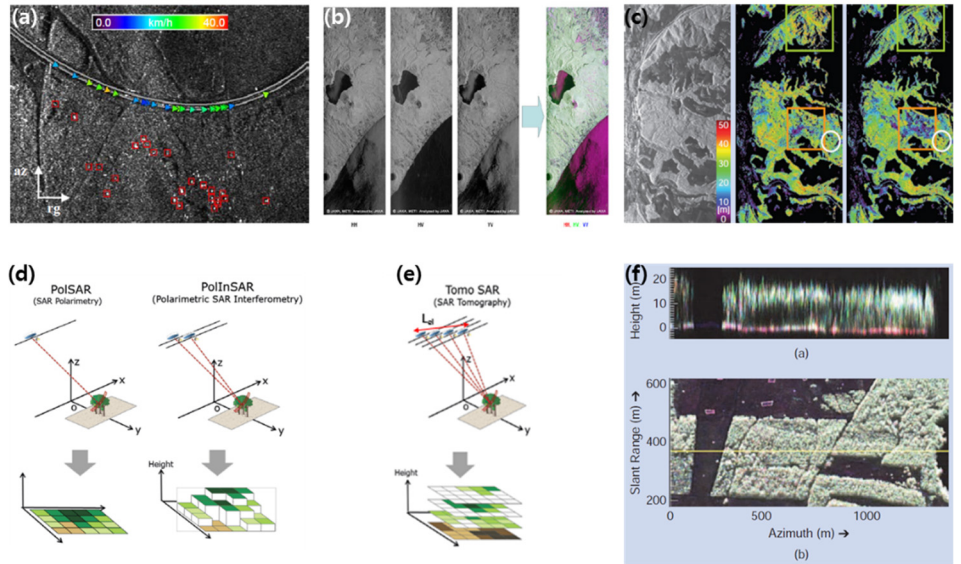


Fig. 6. Polarimetric and interferometric SAR (a) GMTI [26], (b) ALOS/PALSAR polarimetry [30], (c) PolInSAR [8], (d) PolSAR vs PolInSAR [33], (e) SAR tomography [33], (f) SAR tomography forest characteristics and height [8]. GMTI, Ground Moving Target Indication; ALOS-2, Advanced Land Observing Satellite-2; PALSAR, Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar; PolInSAR, Polarimetric SAR Interferometry; PolSAR, Polarimetric SAR.

리할 수 있는 물리학적 모델을 개발할 수도 있다[8]. Fig. 6b는 ALOS/PALSAR(Advanced Land Observing Satellite/Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar, 첨단지상관측위성/위상배열 L-밴드 합성개구레이다) 프로젝트에서 촬영한 편파 영상이다[30].

SAR 편파(polarimetry) 기술을 발전시켜 간섭계(interferometry) 기술을 접목한 polarimetric SAR interferometry는 다중 편파로 얻어진 하나 또는 그 이상의 SAR 간섭계 영상을 조합하여 자연물 또는 인공 구조물 상에 존재하는 산란체들의 수직 분포 및 구조 특성을 파악할 수 있는 방법이다[23,31,32]. Fig. 6c는 polarimetric SAR interferometry로 구한 숲의 높이 지도이다. Fig. 6d는 polarimetric SAR와 polarimetric SAR interferometry 기술을 비교한 그림이다.

2.3.4 SAR tomography

SAR tomography는 SAR의 기본 개념인 인공위성이 진행하는 방위방향으로 합성개구를 형성하여 방위방향 해상도를 높이는 것과 유사한 원리를 이용하며, Fig. 6e와 같이 다양한 고도각 방향으로 영상을 획득하여 기존의 SAR 영상 정보에 높이 정보까지 획득할 수 있는 기법이다[8,23,33-35]. 이중기준선(dual-baseline)으로 영상을 획득하는 polarimetric SAR interferometry와는 다르게, SAR tomography는 다중기준선(multi-baseline)으로 영상을 획득하여 산란체들의 수직 분포 및 구조 특성을 더욱 명확하게 파악할 수 있다[8]. Fig. 6e를 Fig. 6d와 비교하면 SAR tomography와 polarimetric SAR, 그리고 SAR tomography와 polarimetric SAR interferometry와의 차이를 알 수 있다. Fig. 6f는 산림 특성 및 높이를 SAR tomography 기법으로 구현한 것이다[8,23].

3. 향후 HRWS SAR(High Resolution Wide Swath Synthetic Aperture Radar) 위성 개발전략

3.1 해외 HRWS SAR 위성 개발 사례

향후 우리나라 HRWS SAR 위성 개발전략을 세우기 위해, 앞서 살펴본 SAR 탑재체 및 SAR 영상 처리 기술 개발 동향과 더불어, 해외 HRWS SAR 위성 개발 사례를 살펴보았다.

2009년부터 TSX는 Fig. 7a와 같이 DRA(Dual Receive Antenna, 이중수신안테나)를 사용하여 2채널 DPCA 기술을 시험하였다[36]. 그 결과 Fig. 7b에서처럼, 모호성 억제(ambiguity suppression)를 통해 고스트 영상이 사라진, 보다 선명한 영상을 얻을 수 있었다. Fig. 7b에서 위의 그림은 일반적인 단독 안테나 모드로 촬영한 영상이고 아래의 그림은 DRA 모드로 촬영한 영상이다.

2013년과 2014년에 TSX를 사용하여 고도각 방향으로 SCORE 기술을 시험하였다[37]. TSX는 이 시험을 위해 2개의 빔을 교대로 사용하는 방법을 사용하였다[37]. Fig. 7c에서 볼 수 있듯이, 왼쪽 그림의 빨간 사각형 안에서 보이는, 모호성(ambiguity)로 인해 생성된, 고스트 형상이 오른쪽 그림에는 보이지 않는다. Fig. 7c에서 왼쪽 그림은 1개 빔으로 촬영한 영상이고 오른쪽 그림은 2개의 빔을 고도각 방향으로 교대로 사용하여 촬영한 영상이다[37].

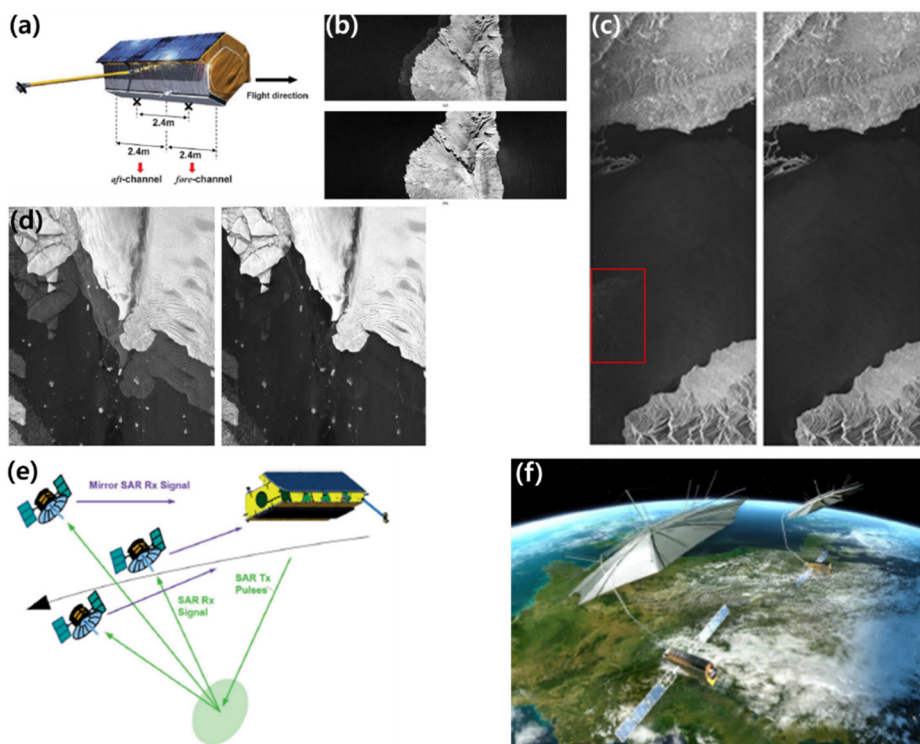


Fig. 7. Foreign cases of HRWS SAR development. (a) TSX 2 channels DRA [36], (b) TSX 2 channels ambiguity suppression [36], (c) TSX SCORE ambiguity suppression [37], (d) TSX-TDX 4 channels ambiguity suppression [38], (e) MirrorSAR concept [39], (f) Tandem-L concept [42]. HRWS, High Resolution Wide Swath; TSX, TerraSAR-X; SCORE, SCan-On-Receive; DRA, Dual Receive Antenna.

2014년에 TSX와 TDX는 각각 DRA 모드를 사용하여 4채널로 확장된 DPCA 기술을 시험하였다[38]. 그 결과, Fig. 7d에서처럼 모호성 억제를 통해 고스트 영상이 사라진, 보다 선명한 영상을 얻을 수 있었다. DLR은 Fig. 7e에서와 같이 SAR 신호 송신을 담당하는 1대의 HRWS 위성과 지상에서 반사된 SAR 신호를 수신하여 다시 HRWS 위성에 전달하는 3대의 수신전용 위성으로 구성된 mirrorSAR를 제안하였다[39]. 이 프로젝트는 수신을 담당하는 위성이 단지 SAR 신호 전달 역할만을 수행하기 때문에 중저가에 획득할 수 있다는 장점이 있으며 2024년 발사가 계획되어 있다[39,40].

DLR은 또한 Fig. 7f에서와 같이 직경 15 m의 reflector 안테나를 장착한 두 개의 위성으로 이루어진 Tandem-L 프로젝트를 제안하였다. 이 위성은 SCORE 기술을 이용하여 staggered SAR[41]을 구현할 예정이다. 이 기술로 인해 Tandem-L은 최대 약 350 km의 관측폭을 가질 수 있으며, 지구 전역을 약 1주에 2번 정도 촬영할 예정이다[41,42]. 또한 고해상을 얻기 위해 다중 방위각 방향 채널을 탑재할 예정이고, 2024년 발사 예정이다[41,42].

Airbus는 DLR과 함께 worldSAR 군집위성 개념을 제안하였다[43]. WorldSAR는 국적은 다르지만 비슷한 성능의 SAR 위성을 군집 운용하여 재방문주기를 줄이고 관측능력을 넓히며, 관측의 연속성을 제공한다는 개념을 가지고 있다[43]. 현재 worldSAR 군집위성은 독일의 TSX/TDX 그리고 스페인의 PAZ로 구성되어 있으며, PAZ는 스페인어로 평화라는 의미이며 TSX를 기반으로 만들어진 위성이다[43].

해외 HRWS SAR 위성 개발 사례를 살펴보면 우리가 알 수 있는 것은, 민간 SAR 관련 정보가 개방된 국가 중 최고의 기술수준을 가지고 있는 독일과 같은 해외 SAR 위성 선진국은 높은 해상도를 가지면서 동시에 넓은 관측폭을 제공할 수 있는 HRWS SAR 위성 개발에 많은 투자를 하고 있다는 것이다. 또한, HRWS SAR 이전까지 모호성 문제 때문에 SAR 영상의 해상도를 높이려면 관측폭을 희생해야 하고 관측폭을 넓히려면 해상도를 희생해야 했지만, HRWS SAR의 핵심기술인 DBF과 다중채널 기술이 개발되고 우주 궤도시험에 성공하면서 이 모호성 문제는 극복될 수 있다는 것이 증명되었다는 것이다.

3.2 향후 우리나라 HRWS SAR 위성 개발전략

해외 사례를 토대로 우리나라의 HRWS SAR 위성 개발전략을 아래와 같이 제안한다.

- (1) TSX 형태로 개발되는 KOMPSAT-6호의 dual phase center[44] 기능을 통해 2채널 DPCA 시험을 실시하여 관련 기술을 확보한다.
- (2) KOMPSAT-6의 2개 빔을 사용한 고도각 방향 SCORE를 시험하여 관련 기술을 확보한다.
- (3) KOMPSAT-6과 KOMPSAT-5의 궤도가 겹치는 기간을 이용하여 2개 이상의 다중채널 및 multistatic SAR를 시험하여 관련 기술을 확보한다.
- (4) KOMPSAT-6의 업그레이드 버전을 개발할 때, 다수의 초소형 위성을 수신전용 위성으로 함께 운용할 수 있도록 한다.
- (5) (1)-(4)에서 언급된 기술들이 확보되고 성숙되었을 때, Tandem-L과 같은 대형 안테나를 장착하고 일주일 단위로 전 지구 관측을 반복할 수 있는 SAR 위성을 개발한다.

(6) WorldSAR와 같이 다국적 SAR 위성을 군집 운용하는 국제협력기구에 참가하여 다양한 SAR 영상을 확보함과 동시에, 이를 사용하여 polarimetry SAR interferometry, tomography와 같은 3D SAR 영상처리 기술을 개발한다.

앞에서 언급한 기술 외에도 HRWS SAR 영상촬영 시 발생하는 많은 양의 데이터를 보다 효과적으로 처리하기 위해 위성탑재(onboard) 데이터 처리 기술[45] 개발도 병행할 필요가 있다.

4. 결론

지금까지 SAR 탑재체 기술과 SAR 영상처리 기술 동향 및 해외 HRWS SAR 개발 사례를 조사하였다. 그리고 이를 바탕으로 향후 우리나라 HRWS SAR 위성 개발전략을 제안하였다. SAR 탑재체 기술 동향에 관해서는 보편적 SAR 운용 기술뿐 아니라 DBF, SCORE, DPCA 등 최신 SAR 탑재체 기술에 대해서도 함께 조사하였다. SAR 영상처리 기술 동향에 관해서는 간섭계, 편파 등을 이용한 다양한 영상처리 기술에 대해 조사하였다. 그리고 해외 HRWS SAR 개발 사례는 DLR에서 TSX를 활용하여 SCORE와 DPCA 기술을 시험한 것으로부터, 앞으로 수년 내 발사 예정인 Tandem-L까지 알아보았다.

향후 우리나라 HRWS SAR 위성 개발전략에 대해서는 TSX를 활용한 해외 HRWS SAR 개발 사례를 참고하여 수년 내 발사 예정인 KOMPSAT-6를 활용한 HRWS SAR 기술개발 전략을 제안하였다.

앞으로 우리나라가 HRWS SAR 기술을 개발하기 위해서는 장기간에 걸친 많은 투자가 필요하다. 이와 같은 큰 사업을 민간 기업이 단독으로 추진하기엔 많은 위험이 따른다. 그러므로 민간, 공공 및 군사 분야 연구소가 함께 투자하고 협력하여 개발 위험을 줄이는 동시에 서로의 성과를 공유하여 시너지 효과를 확대하는 노력이 필요하다.

감사의 글

부족한 논문의 완성을 위해 세심한 심사를 해주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

1. ESA, RADARSAT-2 (2020) [Internet], viewed 2020 Nov 26, available from: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/radarsat-2>
2. Kwak WG, Satellite image radar (SAR) technology trends, Korea Electromagnetic Engineering Society, Ilsan, 25 Nov 2011.
3. ESA, SAR-Lupe (2020) [Internet], viewed 2020 Nov 26, available from: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/sar-lupe/>
4. ESA, TDX(TanDEM-X) (2020) [Internet], viewed 2020 Nov 26, available from: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x/>
5. ESA, KOMPSAT-5 (2020) [Internet], viewed 2020 Nov 26, available from: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-5/>
6. ESA, ALOS-2 (2020) [Internet], viewed 2020 Nov 26, available from: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos-2/>

7. ESA, COSMO-SkyMed Second Generation (2020) [Internet], viewed 2020 Nov 26, available from: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed-second-generation/>
8. Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, Krieger G, Hajnsek I, et al., A tutorial on synthetic aperture radar, *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 1, 6–43 (2013). <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
9. Curlander JC, McDonough RN, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing* (John Wiley & Sons, Hoboken, 1991).
10. Carrara WC, Goodman RS, Majewski RM, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms* (Artech House, Norwood, 1995).
11. Moreira A, Zink M, Reigber A, Neff T, Krieger G, et al., *Research Results and Projects Status Report 2011–2017* (Microwaves and Radar Institute, Weßling, 2018).
12. Petrie G, Current & future spaceborne SAR systems, in the 8th International Scientific & Technical Conference, Porec, Croatia, 4 Sep 2008.
13. Younis M, Synthetic aperture radar (SAR) principles and applications, in 6th ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing, Bucharest, Rumania, 14–18 Sep 2015.
14. Meta A, Prats P, Steinbrecher U, Mittermayer J, Scheiber R, TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison, in EUSAR Conference, Friedrichshafen, 2–5 Jul 2008.
15. Krieger G, Advanced bistatic and multistatic SAR concepts and applications, in EUSAR Conference, Dresden, 16–18 May 2006.
16. Krieger G, Younis M, Gebert N, Huber S, Bordoni F, et al., Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging, in EUSAR Conference, Aachen, 7–10 Jun 2010.
17. Costa M, Passaro A, Trends for spaceborne synthetic aperture radar for Earth-observation, in XVII Simposio de Aplicacoes Operacionais em Areas de Defesa Conference, São José dos Campos, Sep 2015.
18. Krieger G, MIMO-SAR: opportunities and pitfalls, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 52, 2628–2645 (2014). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2263934>
19. Entekhabi D, Yueh S, O'Neill PE, Kellogg KH, Allen A, et al., *SMAP Handbook* (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 2014).
20. Rosen PA, Hensley S, Joughin IR, Li FK, Madsen SN, et al., Synthetic aperture radar interferometry, *Proc. IEEE.* 88, 333–382 (2000). <https://doi.org/10.1109/5.838084>
21. Bamler R, Hartl P, Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Probl.* 14, R1 (1998). <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
22. TRE ALTAMIRA, InSAR interferometric synthetic aperture radar (2021) [Internet], viewed 2021 Jan 30, available from: <https://site.tre-altamira.com/>
23. Yang D, Recent trends in synthetic aperture radar (SAR) applications and technology, *Curr. Ind. Technol. Trends Aerosp.* 16, 127–135 (2018).
24. Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthéry N, Crippa B, Persistent scatterer interferometry: a review, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 115, 78–89 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>

25. Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F, et al., A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49, 3460-3470 (2011). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
26. Suchandt S, Eineder M, Müller R, Laika A, Hinz S, et al., Development of a GMTI processing system for the extraction of traffic information from TerraSAR-X data, in *EUSAR Conference*, Dresden, 16-18 May 2006.
27. Bae CS, Jeon HM, Yang DH, Yang HG, Ground moving target's velocity estimation in SAR-GMTI, *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.* 28, 139-146 (2017). <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.2.139>
28. Rousseau LP, Chouinard JY, Gierull C, Performance analysis of HRWS/GMTI for space-based SAR using sparse arrays, *Proceedings of the 17th International Radar Symposium (IRS)*, Krakow, Poland, 1-5 May 2016.
29. Yang T, Wang Y, Li W, A moving target imaging algorithm for HRWS SAR/GMTI systems, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 53, 1147-1157 (2017). <https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2667858>
30. Earth Observation Research Center, Polarimetric observation by PALSAR Earth Observation Research Center (2006) [Internet], viewed 2021 Nov 24, available from: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/img_up/pal_polarization.htm
31. Cloude SR, Papathanassiou KP, Polarimetric SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36, 1551-1565 (1998). <https://doi.org/10.1109/36.718859>
32. Papathanassiou KP, Cloude SR, Single-baseline polarimetric SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 2352-2363 (2001). <https://doi.org/10.1109/36.964971>
33. Heliere F, Fois F, Arcioni M, Bensi P, Fehringer M, et al., Biomass P-band SAR interferometric mission selected as 7th Earth Explorer Mission, in *EUSAR Conference*, Berlin, 3-5 Jun 2014.
34. Reigber A, Moreira A, First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 2142-2152 (2000). <https://doi.org/10.1109/36.868873>
35. Fornaro G, Pauciullo A, Reale D, Zhu X, Bamler R, SAR tomography: an advanced tool for 4D spaceborne radar scanning with application to imaging and monitoring of cities and single buildings, *IEEE Geosci. Remote Sens. Newsl.* 2012-12, 9-17 (2012).
36. Kim JH, Younis M, Prats-Iraola P, Gabele M, Krieger G, First spaceborne demonstration of digital beamforming for azimuth ambiguity suppression, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 51, 579-590 (2013). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2201947>
37. Bertl S, Lopez-Dekker P, Wollstadt S, Krieger G, Demonstration of digital beamforming in elevation for spaceborne synthetic aperture radar, in *EUSAR Conference*, Berlin, 3-5 Jun 2014.
38. Kraus T, Braeutigam B, Bachmann M, Multistatic SAR imaging: first results of a four phase center experiment with TerraSAR-X and TanDEM-X, in *EUSAR Conference*, Hamburg, 6-9 Jun 2016.

39. Mittermayer J, Krieger G, Bojarski A, Zonno M, Villano M, et al., A MirrorSAR case study based on the X-band High Resolution Wide Swath Satellite (HRWS), in EUSAR Conference, Leipzig, 29 Mar-1 Apr 2021.
40. Spiridonova S, Kahle R, HRWS – an ambitious 4+satellite formation flying mission, in 18th Australian Aerospace Congress, Melbourne, 24-26 Feb 2019.
41. Huber S, Villano M, Younis M, Krieger G, Moreira A, et al., Tandem-L: design concepts for a next-generation spaceborne SAR system, in EUSAR Conference, Hamburg, 6-9 Jun 2016.
42. Moreira A, Bachmann M, Balzer W, Tridon DB, Diedrich E, et al., Tandem-L: project status and main findings of the phase BI study, in IGARSS 2018, Valencia, 22-27 Jul 2018.
43. Janoth J, Jochum M, Petrat L, Knigge T, High resolution wide swath – the next generation X-band mission, in IGARSS, Yokohama, 28 Jul-2 Aug 2019.
44. Lee S, Yoon J, Kim J, KOMPSAT-6 mission, operation concept, and system design, in EUSAR Conference, Hamburg, 6-9 Jun 2016.
45. Villano M, Krieger G, Del Zoppo V, On-board Doppler filtering for data volume reduction in spaceborne SAR systems, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett, 13, 1173-1177 (2016). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2574886>

Author Information

고 응 대 udko@add.re.kr



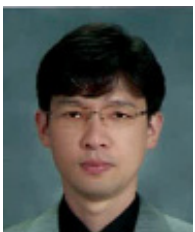
University of Texas at Austin 항공우주공학과에서 2008년 박사학위를 취득한 후, 2013년 3월 까지 Center for Space Research/UT에서 연구원으로 근무하였다. 2013년 4월부터 국방과학연구소에서 SAR위성 검보정 계획 및 검보정 인프라 구축과 관련 업무를 수행하고 있다.

이 주 영 juyoung_lee@add.re.kr



한국과학기술원 항공우주공학과에서 2013년 석사학위를 취득한 후, 2013년부터 지금까지 국방과학연구소 국방위성체계단에서 위성궤도 및 임무분석 업무를 수행하고 있다.

서 인 호 inho@add.re.kr



한국과학기술원 항공우주공학과에서 2008년 박사학위를 받았다. 한국과학기술원 인공위성 연구소에서 과학기술위성1호부터 3호까지 개발에 참여하였으며, 삼성전자 생산기술연구소에서 반도체 메모리 검사장비를 개발하였다. 현재는 국방과학연구소 국방위성체계단에서 체계종합

업무를 수행하고 있다.

정 현 재 nowholic@add.re.kr



전북대학교 기계공학과에서 2019년에 석사학위를 취득한 후, 2019년부터 지금까지 국방과학연구소 국방위성체계단에서 위성 체계종합 업무를 수행하고 있다.