

소형위성 SAR 설계 기술



안진홍
아주대학교
우주전자정보공학과



정해원
아주대학교
우주전자정보공학과



김두환
아주대학교
우주전자정보공학과



김재현
아주대학교 전자공학과

I. 서론

SAR는 전자기파를 이용하는 능동형 센서로 태양을 광원으로 하여 반사원의 영상을 획득하는 광학센서와 달리 기상조건이나 밤낮에 관계없이 영상을 획득할 수 있다. 1951년, Carl Wiley가 DBS (Doppler beam sharpening) 기술을 선보인 이후 주로 우주선 및 항공기 탑재 등의 군사목적으로 활용이 제한되었지만, 1978년부터 위성에 SAR를 탑재하여 지구를 관측하는 데에 관심을 가지게 되었다. 최초의 위성 SAR인 미국의 SEASAT을 시작으로 유럽우주국(ESA)의 ENVISAT, 캐나다우주국(CSA)의 RADARSAT, 일본의 PALSAR 등 많은 국가에서 성공적으로 위성 SAR를 개발하였다. 하지만 기존의 위성 SAR들은 너무 많은 시간과 비용이 투자되었고, 1990년대에 이후, 관련 분야의 기술이 발전하면서 위성 SAR의 개발 기간과 비용을 줄이기 위한 연구가 진행되어 왔다^[1].

SAR는 전자기파를 이용하는 능동형 센서로 태양을 광원으로 하여 반사원의 영상을 획득하는 광학센서와 달리 기상조건이나 밤낮에 관계없이 영상을 획득할 수 있다

본문에서는 위성 SAR에 대한 최근 기술 동향과 소형경량화 이슈에 대해 살펴보고, 소형위성 SAR의 시스템 설계 방안을 연구하여 주어진 임무 및 요구조건을 만족하는 시스템 변수를 도출하며, 그 중 SAR 시스템의 핵심기능을 담당하는 chirp 신호 발생기의 설계에 대해서 논의한다.

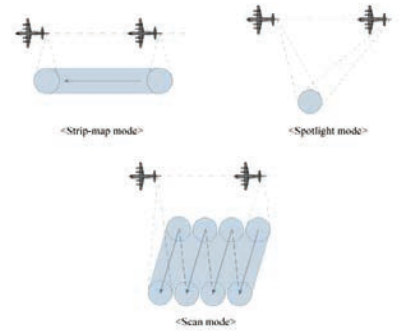
II. SAR 기술

1. SAR

SAR는 synthetic aperture radar의 약자로, 한글로는 합성개구레이더 또는 영상레이더로 정의된다. 일반적으로 레이더란 전파를 송수신하여 표적을 탐지하고 거리를 측정하는 장치를 말한다. SAR는 이러한 레이더의 한 종류로, 전파를 이용하여 관측대상의 영상을 획득하는 센서이다. Doppler 효과를 이용하여 영상을 획득하기 때문에 반드시 움직이는 플랫폼에 탑재되어야 하며, 스스로 전자파를 송신하고 수신하기 때문에 능동형 센서로 구분된다. 능동형 센서의 반대인 수동형 센서의 대표적인 예로는 가시광선의 반사된 정보만 수집하는 광학센서(광학카메라)가 있다.

광학센서는 광원이 있어야만 관측이 되고, 가시광선의 투과율이 낮기 때문에 기상조건이 안 좋을 경우 관측이 어렵다. 이에 반해 SAR는 밤낮에 관계없이 관측이 가능하며, 전자파의 투과율이 높기 때문에 악천후에도 관측할 수 있다. 이러한 이점 때문에 지구관측, 군사정보 획득, 자연재해 감시와 자원탐사 등에 주로 활용되고 있다. <표 1>에 광학센서와 SAR를 비교하여 나타내었다.

SAR는 크게 세 가지 동작모드를 사용한다. Strip-map 모드는 가장 일반적으로 동작하는 방법으로, 빔을 고정시킨 채로 플랫폼의 진행방향을 따라 연속적으로 촬영하는 방법이다. 정찰 범위가 넓으며 적당한 해상도를 제공한다. ScanSAR 모드는 넓은 지역의 대략적인 영상을 획득하기 위해서 빔을 진행방향에 수직으



<그림 1> SAR의 동작모드

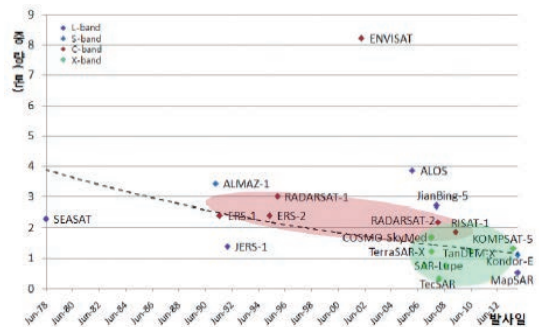
로 조향하면서 촬영하는 방법이다. 가장 낮은 해상도를 제공하지만 넓은 지역의 영상을 얻을 수 있다. Spotlight 모드는 지형 및 목표물을 자세히 식별하기 위해 빔을 진행방향에 수평으로 조향하여 특정지역에 집중한다. 영상을 합성하는 데 걸리는 시간보다 길게 촬영하여 정밀한 영상을 획득하며 가장 정밀한 해상도를 제공한다. <그림 1>에 SAR의 동작모드를 나타내었다.

최근에는 SAR 데이터의 활용에 대한 지속적인 연구개발로 처음의 군사목적에서 점점 더 민수분야로 영역이 넓어지고 있다. 영상 획득에 사용된 전자기파의 편파 특성을 활용하여 지상의 표고모델을 제작하기도 하며, 목표물의 반사특성에 대한 데이터 분석을 이용하여 자원의 탐사에도 활용되면서 활용 범위가 점차적으로 넓어지고 있으며, 기술의 중요성도 커지고 있다. 이러한 흐름에 맞추어 우리나라는 2013년 8월 SAR 탑재 위성인 다목적 실용위성 5호의 발사로 위성 SAR 보유국의 대열에 참여

우리나라는 2013년 8월 SAR 탑재 위성인 다목적 실용위성 5호의 발사로 위성 SAR 보유국의 대열에 참여하였으며, 국가 연구기관, 방위산업체와 각 대학의 관련학과를 중심으로 SAR에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

<표 1> 광학센서와 SAR의 비교

특징	광학센서	SAR
사용 스펙트럼	가시광선	전파
센서 분류	수동형	능동형
기상조건과 밤낮의 영향	높음	거의 없음
영상 이해도	쉬움	어려움
영상 왜곡	거의 없음	다수 존재



<그림 2> 위성 SAR의 무게 변화 추세

하였으며, 국가 연구기관, 방위산업체와 각 대학의 관련 학과를 중심으로 SAR에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

현재 운용 중인 위성 SAR는 대부분 지구관측의 용도로 운용되고 있으며, 1978년 SEASAT의 발사 이후로 지속적으로 성능이 향상되어왔다. SAR의 중요한 성능 지표 중 하나인 해상도는 최초 25 m 에서 현재 서브미터급의 해상도까지 구현이 되고 있다. 고해상도의 영상을 얻기 위하여 운용주파수 또한 X-밴드까지 구현이 되었으며 Ku-밴드의 주파수를 운용할 수 있는 방안이 연구되고 있다. 위성과 관측지역과의 위치에 따라서 다양한 모드를 가변적으로 지원한다.

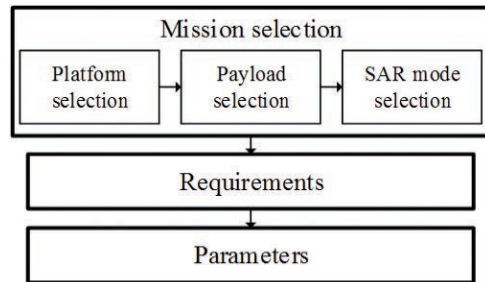
2. 소형위성 SAR

소형위성은 저궤도 실용위성과 차별되는 개념으로 저비용과 짧은 개발기간으로 개발이 가능한 위성 본체를 기반으로 우주과학, 기술시험, 우주탐사 등의 임무를 수행하며 미니위성(500 kg 이하), 마이크로위성(100 kg 전후), 나노위성(10

kg 전후)과 피코위성(1 kg 전후)으로 분류된다^[2]. 본문에서는 이 중에서 마이크로 위성을 목표로 두고 논의한다.

현재 세계 위성개발은 점차 양분화 되어가는 추세이며, 정지궤도 위성은 탑재 중계기의 숫자, 수명 및 전력의 증가가 수익과 직결되어 가능한 한 많은 수의 중계기를 탑재하려는 노력이 계속되어 왔고 우주개발기간 동안 줄곧 위성의 대형화를 유도해왔다. 한편, 1990년대에 이르러 미세 전자기술 및 가공기술과 같은 소형화 기술의 발전과 함께 저궤도용 위성개발은 발사기간 단축, 비용 절감, 성능 향상의 위성개발 모토 하에 중·대형 위성이 수행하던 기능을 다수의 소형위성을 활용하여 수행할 수 있도록 하려는 연구가 계속되고 있다.

소형위성의 경우, 보다 적은 위험부담으로 새로운 기술을 위성에 적응하기 위한 연구가 수행되고 있으며, 위성 부품의 우주인증, 핵심기술 선행연구 및 교육 등 다양한 목적으로 개발되고 있다^[3]. <그림 2>는 SAR를 탑재한 위



<그림 3> SAR 시스템 설계 과정

성들의 무게 변화를 나타낸다. 최근 소형위성 동향은 하나의 위성에 하나의 센서만을 탑재하는 대신 주변의 여러 위성들과의 위성군(constellation)을 활용하여 다양한 정보를 획득하는 방향으로 진행되고 있다.

세계 위성개발의 소형화 추세에 따라 위성 SAR 또한 소형화에 대한 연구가 다각적으로 진행되고 있다. 일

소형위성의 경우, 보다 적은 위험부담으로 새로운 기술을 위성에 적응하기 위한 연구가 수행되고 있으며, 위성 부품의 우주인증, 핵심기술 선행연구 및 교육 등 다양한 목적으로 개발되고 있다.

본의 Chiba 대학교는 100 kg급 소형위성에 CP-SAR (circular polarized-SAR)를 탑재하는 연구를 진행하고 있으며, JAXA-ISAS 연구소는 100 kg급 X-band SAR를 발사하기 위해 연구 중에 있다. 국내에서는 아주대학교가 항공우주

연구원과 함께 100 kg급 L-band SAR 시스템을 설계하고 있다.

III. 소형위성 SAR 설계

1. SAR 시스템 설계

SAR 시스템 설계를 위해서는 먼저 사용자의 목적에 따른 임무가 정해져야 한다. 이에 따라 기술적으로 도달해야 하는 요구사항이 설정되며, 이를 바탕으로 설계변수를 최종적으로 도출한다. <그림 3>은 SAR 시스템 설계를 위한 절차를 나타낸 것이다. 임무 설정에서 SAR를 탑재할 플랫폼을 100kg급의 저궤도 소형위성으로 설정한다. 지구관측을 임무로 설정하였기 때문에 투과율이 높은 L-band (1.27 GHz)의 주파수를 사용한다. 또한 소형위성은 높은 전력을 조달할 수 없으므로 상대적으로 저전력인 L-band가 적합하다. 저전력 및 경량화를 고려하였

으며, SAR의 동작 모드는 빔 조향을 위한 추가적인 기계적, 전기적인 방법이 필요 없는 strip-map 모드로 설정하였다.

임무 설정을 마치면 SAR 시스템 설계 시 반드시 고려되어야 하는 요구사항들이 필요하다. <표 2>는 SAR 시스템 설계 시 요구사항을 나타낸다^[4]. 요구사항에는 해상도, look angle, 탐지 폭, 운용 주파수, SNR (signal to noise ratio), 탑재체의 무게, 전력 등이 있다^[5]. 앞서 설정한 임무 및 요구사항을 바탕으로 영상레이더 시스템 설계변수 도출 흐름도를 <그림 4>에 도시하였다. 설계변수 도출 흐름도에 따라 입력 파라미터에는 고도(h), 관측방향의 각도(γ), 운용 주파수(f_c), 플랫폼의 속도(V_{st})가 있고, 안테나에 관해서

SAR 시스템 설계를 위해서는 먼저 사용자의 목적에 따른 임무가 정해져야 한다. 이에 따라 기술적으로 도달해야 하는 요구사항이 설정되며, 이를 바탕으로 설계변수를 최종적으로 도출한다.

는 안테나의 크기, 빔 폭(θ_r, θ_{az}), 온도(T_{ant})가 있다. 해상도는 거리 방향(δ_r), 방위 방향(δ_{az}), 펄스 폭(τ_p) 등이 계산된다. PRF (pulse repetition frequency)는 신호가 송수신되는 과정에서 송신 윈도우와 수신 윈도우가 겹치지 않도록 고려하며, 탐지 폭은 PRF에 의해 최대 폭이 결정되지만 데이터의 저장용량, 처리속도 등에 따른 제한사항을 고려하여 설정한다. 모호성은 영상의 품질을 결정하는 파라미터로서, 거리방향과 방위 방향으로의 모호성 비를 각각 설정해야 한다. 최종적으로 시스템 성능 평가지표인 SNR을 레이더 방정식으로부터 도출한 식을 사용하여 계산하며, σ_0 는

NESZ (noise equivalent sigma zero)로서, SNR=1일 때의 값이며 관측대상에 따라 고려하여 만족하는 값을 설정해야 한다.

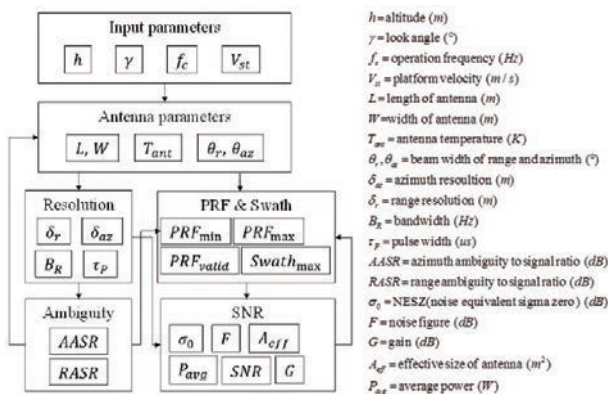
좋은 품질의 영상을 얻기 위해서 SNR은 5 dB 이상의 값이 요구되며, σ_0 는 일반적으로 -20 dB 정도의 값이 요구된다. 각각의 설계변수들은 서로 연관되어 있어서 반복적인 계산과정을 통해서 소형위성에 적합한 파라미터를 도출해야 한다^[6-7].

<표 2> SAR 시스템 설계 요구사항

Geometry parameters	Resolution	m
	Look angle	deg
	Swath width	km
Microwave physical parameters	Wavelength	m
	Polarization	-
System performance evaluation parameters	NESZ	dB
	SNR	dB
	Antenna gain	dB
	Loss	dB
Mission parameters	Payload mass	kg
	Power	W
	Altitude	km

<표 3> SAR 시스템 설계변수 도출 결과

Operational SAR mode	Strip-map mode
Altitude	600 km
Frequency	1.27 GHz (L-band)
Bandwidth	15 MHz
Pulse width	30 s
Polarization	Linear polarization
Antenna gain	31 dB efficiency: 0.6
Antenna size	5 m (L) × 1.8 m (W)
Resolution	2.5 m (방위 방향) 10 m (거리 방향)
Swath width	59 km
PRF	2220 Hz
Look angle	21°
Peak transmit power	≃ 500 W
Average transmit power	30 W
NESZ	-25 dB
Payload weight	< 30 kg



<그림 4> SAR 시스템 설계변수 도출 흐름도

위와 같은 과정으로 <표 3>에 소형위성용 L-band SAR 시스템 설계변수를 도출한 결과를 나타내었다. 안테나의 효율은 0.6으로 가정하여 안테나 크기에 따라 얻을 수 있는 이득은 31 dB이며, 방위 방향 해상도는 안테나의 길이(L)와 연관이 있으므로 2.5 m의 값이 계산된다. 거리 방향 해상도는 신호 대역폭(B)에 따라 약 10 m로 계산되며, 소형위성에 탑재하기 위해 탑재체의 무게는 30 kg 이하로 설정하였다.

2. PDDS (parallelized direct digital synthesizer) chirp 신호 발생기

Chirp 신호 발생기는 SAR 시스템의 구성요소 중 핵심에 해당하는 기술이다. SAR에서 사용하는 chirp 신호는 LFM (linear frequency modulated) 신호의 한 종류로, 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변화하는 신호이다. Chirp 신호를 사용하는 가장 큰 이유는 낮은 전력으로도 펄스 압축(pulse compression) 기술을 이용하여 고해상도의 영상을 얻을 수 있기 때문이다.

$$s(t) = \text{rect}(t/T) \exp(j\pi Kt^2) \quad (1)$$

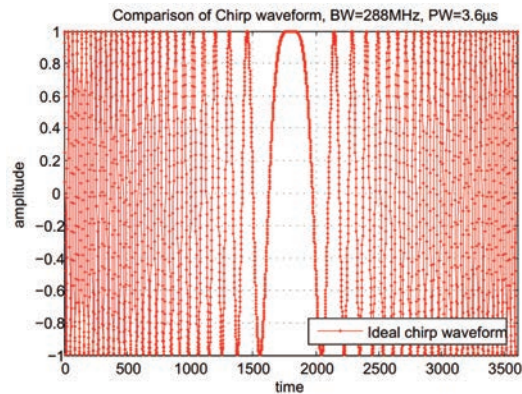
$$\phi = \pi Kt^2 \quad (2)$$

Chirp 신호는 식(1)과 같이 정의된다. 여기서 T는 신호의 주기를 의미한다. 지수 항은 신호의 위상을 나타내며 식(2)와 같이 정의된다. 위상을 시간에 대하여 미분하면 식(3)과 같이 각주파수가 나타나게 되고, 이를 2π로 나누면 식(4)와 같이 주파수가 도출된다.

$$\omega = \frac{d\phi(t)}{dt} = 2\pi Kt \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega = Kt \quad (4)$$

도출된 주파수를 보면 주파수가 시간에 대해 K의 비율로 선형적으로 변화하는 값이며, 이때의 K를 chirp rate라고 한다^[8]. 식(1)에 나타난 chirp 신호는 Euler's formula를 사용하여 실수부와 허수부로 나눌 수 있으



<그림 5> 이상적인 양방향 chirp 신호

며, 이를 각각 I data와 Q data로 정의한다. 식(5)에 I, Q data를 구분하여 나타내었다.

$$s(t) = \text{rect}(t/T) [\sin(\pi Kt^2) + j\cos(\pi Kt^2)] \quad (5)$$

이상적인 양방향 chirp 신호를 <그림 5>에 나타내었으며, 신호의 주파수가 양방향으로 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Chirp 신호를 만드는 chirp 신호 발생기는 크게 아날로그 방식과 디지털 방식으로 분류된다. 최근의 동향으로는 아날로그 방식보다는 디지털방식의 chirp 신호 발

생기를 사용하고 있으며, 그 중에서도 memory-map based 방식의 chirp 신호 발생기가 많이 사용되고 있다.

Memory-map based 방식은 신호를 메모리에 저장해두고 이를 그대로 출력하는 방식으로, 출력신호의 성능이 안정적이다. Memory-

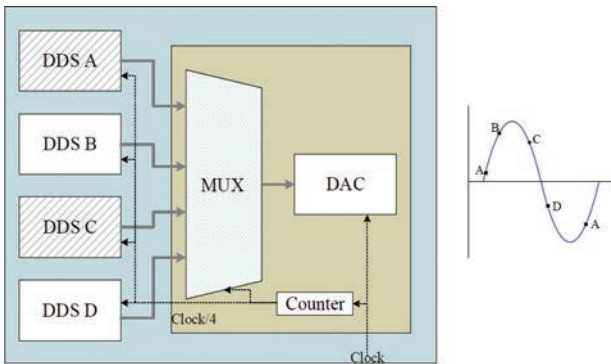
map based 방식과 다른 방식으로는 DDS (direct digital synthesizer) 방식이 있다. 이는 각 위상 별로 파형을 저장해두고 위상을 컨트롤하여 신호를 생성하는 방식으로, 유동적으로 신호를 생성할 수 있다는 장점이 있다.

SAR를 우주에서 운용할 경우 외적인 요인에 의해 시스템의 메모리 소자가 손상되기 쉽다. 따라서 메모리 소자의 의존도가 memory-map based 방식에 비해 상대적으로 낮은 DDS 방식의 chirp 신호 발생기가 고안되었다.

SAR를 우주에서 운용할 경우 외적인 요인에 의해 시스템의 메모리 소자가 손상되기 쉽다. 따라서 메모리 소자의 의존도가 memory-map based 방식에 비해 상대적으로 낮은 DDS 방식의 chirp 신호 발생기가 고안되었다.

〈표 4〉 SAR 시스템 설계변수 도출 결과

파라미터	수치
중심 주파수	1,27 GHz
대역폭	16 MHz
각 DDS의 대역폭	4 MHz
샘플링 주파수	2400 MHz
DDS 개수	4



〈그림 6〉 PDDS의 구조

하지만 DDS 방식의 경우 출력신호의 특성이 떨어져 아직 까지 위성 SAR에 사용되지 않고 있으며, 우주에서 사용되는 소자의 경우 부품의 출력성능이 제한되어 있어서 원하는 출력의 DDS chirp 신호 발생기를 사용할 수 없다.

이러한 제한을 극복하기 위해서는 동작주파수를 낮추거나 낮은 동작주파수의 DDS를 여러 개 연결하

는 PDDS 방식을 사용하는 방법이 있다. PDDS 방식은 〈그림 6〉과 같이 DDS 블록들을 병렬로 연결함으로써, 각 DDS의 동작주파수가 전체 동작주파수를 DDS 개수로 나누는 값이 된다^[9]. 일반적으로 L-band는 사용할 수 있는 대역폭이 15MHz에서 40MHz 정도로 제한된다. 따라서 16MHz의 대역폭을 설정하여 PDDS chirp 신호 발생기를 설계하였다. 표 4에 chirp 신호 발생기의 설계 사양을 나타내었다. DDS 블록은 4개를 사용하였으며, 각각의 동작주파수는 전체 동작주파수의 1/4만큼 줄어들게 된다.

SAR의 기술은 영상화 기법 및 단순 해석 기법 외에도 매우 다양한 기법들이 있다. 이러한 기술적인 진보가 새로운 위성 SAR 시스템의 등장을 촉진시키고, 다양한 활용 분야를 만들어내고 있다.

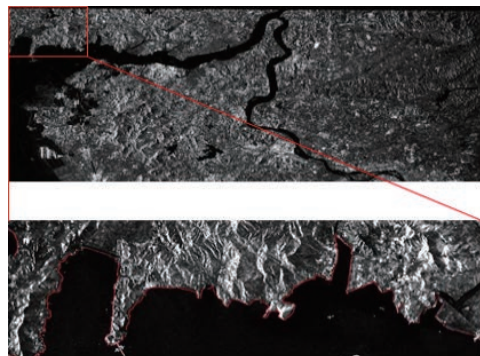
IV. SAR 데이터의 활용

SAR의 기술은 영상화 기법 및 단순 해석 기법 외에도 매우 다양한 기법들이 있다. 이러한 기술적인 진보가 새로운 위성 SAR 시스템의 등장을 촉진시키고, 다양한 활용 분야를 만들어내고 있다.

육상에서는 입사각의 차이가 큰 두 영상을 이용하는 스테레오 기법(radargrammetry)으로 지형의 고도를 알아낸다. 또한, 서로 다른 두 위치에서 얻은 두 개의 영상의 위상차를 활용하는 InSAR (interferometry SAR)로 정밀 DEM (digital elevation model)를 얻을 수 있다. 차분 위상기법(differential interferometry SAR, DInSAR)으로 지반의 변위를 측정하기도 하며, 다편파 분석법(polarimetry), 토모그래피(tomography)를 활용하여 산림의 분포나 나무의 높이를 측정한다.

SAR의 영상은 해수면의 거칠기에 따라서 밝기가 변화하므로 이를 활용하여 해양 분야에서 해풍의 풍속과 풍향을 계산한다. 또한 SAR를 이용하여 빙하의 분포와 특성, 빙퇴석의 분포, 빙하의 용융에 따른 산란 특성의 변화를 연구한다. 이 외에도 SAR는 홍수, 화산활동과 사막화 현상에 대해서도 관측을 하는 등 그 활용 분야가 방대하다^[10].

아주대학교 연구팀은 InSAR 프로세싱을 이용하여 SAR 영상 내의 해안선을 추출하였다. 일본 ALOS PALSAR의 데이터를 활용하여 cm급 해상도의 해안선



〈그림 7〉 아주대 연구팀 알고리즘으로 추출한 해안선



지도를 제작하였고, 이를 그림에 나타내었다. 또한, CP-SAR를 이용한 영상 품질 향상에 대한 연구를 진행하였으며, Faraday rotation에 의한 polarization mismatch loss가 감소하여 영상의 품질이 향상되었음을 확인하였다^[11]. CP-SAR는 원형편파를 사용하는 기법으로, 기존의 LP (linear polarization)가 Faraday rotation에 의해 이온층에서 편파면이 회전되면서 발생하는 손실을 줄이기 위한 기법이다.

V. 향후 연구 및 결론

지금까지 위성 SAR에 대한 최근 기술 동향과 소형경량화 이슈에 대해 살펴보고, L-band SAR 시스템 설계 방안 연구결과를 제시하고 임무 및 요구조건에 따른 설계변수를 도출하였으며, SAR 시스템의 핵심기능을 담당하는 chirp 신호 발생기 설계에 대해 간단히 논의하였다. 끝으로, 위의 일련의 과정을 통해서 만들어진 위성 SAR는 실제로 어떻게 활용되고 있는지 살펴보았다.

SAR 시스템 설계는 임무설정과 요구사항 도출을 한 후 그에 따른 설계변수 도출로 진행된다. 저궤도 운용 100 kg급 소형위성, 지구관측에 유리한 L-band 설정, 소형 및 경량화를 위해 빔 조향이 필요 없는 strip-map 모드로 설정하여 시스템 설계사양을 도출하였다. 또한 L-band 소형위성 SAR 탑재에 중점을 두고 chirp 신호 발생기 개발에 대해 논의하였으며, DDS 방식을 기반으로 하여 PDDS chirp 신호 발생기를 구현하였다.

향후 연구를 통하여 SAR 시스템 설계결과가 실제 위성 탑재에 적용 가능한지에 대한 검증 방안을 제시되어야 한다. 또한 설계한 DDS chirp 신호 발생기를 하드웨어로 구현하여 펄스의 오차 특성과 I, Q 불균형, IRF (impulse response function) 분석을 활용하여 성능이 검증된다면 위성 SAR에 탑재할 수 있으리라 생각된다.

최근, 과학기술의 눈부신 발전에도 불구하고 예상치 못한 자연재해로 인한 피해를 입는 경우는 여전히 존재한다. 또한, 새로운 자원의 발견이 아직도 이루어지고 있으며, 세계 평화가 항상 논제로 대두되면서도 각국의 군사력은 더욱 더 강해지고 있다. 이러한 세계 구도는 SAR의

개발을 유도하였고, 지속적인 연구를 요구하고 있다. 아직까지는 영상의 품질과 이해도의 측면에서 광학센서가 유리한 고지를 점하고 있다. 하지만 지속적인 연구개발로 SAR 기술이 양산화 된다면 SAR의 이점으로 인해 다방면으로 활용될 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] R. Klemm, 1999, "SAR Technology-Where are We Going?", IEEE AES Magazine, pp.25-29.
- [2] 과학기술부, 행정자치부, 건설교통부, 외교통상부, 산업자원부, 해양수산부, 국방부, 정보통신부, 기획예산처, "우주개발사업 세부실천로드맵(안)," 2007.
- [3] 장영근, "소형위성 기술 연구개발 동향과 전망," 한국항공우주학회지 pp.118-112 제 31권, 제6호, October 2003.
- [4] Y. -K. Kwag, "Performance Characteristics of the High Resolution, X-band Small Satellite SAR System Design", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, the 11th volume, 7th edition, 2000.
- [5] M. A. Garcia, D. P. Lopez, "Feasibility Study on SAR Systems on Small Satellites," Technical reports, UPC, 2009.
- [6] Merrill, 2008, RADAR HANDBOOK 3th edition, the McGraw-Hill Companies.
- [7] J. Curlander, R. McDonough, 1991, Synthetic Aperture Radar-Systems & Signal Processing, John Wiley & Sons, pp. 9-44.
- [8] M. Y. Chua, V. C. Koo, "FPGA-BASED CHIRP GENERATOR FOR HIGH RESOLUTION UAV SAR," Progress In Electromagnetics Research, PIER 99, pp.71-88, 2009.
- [9] N. Salemo, L. Simone, S. Cocchi, V. Piloni, M. Maei and Cocciolillo, "Wideband arbitrary waveform generator for enhanced spaceborne sar," Radar Conference 2008, EuRAD 2008, European, IEEE, Amsterdam, pp. 416-419, 2008.
- [10] 이훈열, "SAR 영상의 활용," 한국전자파학회지 pp.55-67, 제 22권, 제6호, November, 2011.
- [11] H. I. Yang, J. H. An, H. W. Jung, J. H. Kim, and S. S. Josaphat Tetuko, "Circular polarization implementation on synthetic aperture radar", Proc. in ICTC 2014, Busan, Korea, Oct., 2014.



안진홍

- 2014년 2월 아주대학교 전자공학 학사
- 2014년 3월~현재 아주대학교 우주전자공학 석사과정



김재현

- 1991년 2월 한양대학교 전산공학 학사
- 1993년 2월 한양대학교 전산공학 석사
- 1996년 8월 한양대학교 전산공학 박사
- 1997년~1998년 UCLA 전자과 Post-doctor
- 1998년~1998년 IRI Corp. CA, USA Consultant
- 1998년~2003년 Bell Labs, Lucent Tech, USA, Member of Technical Staff
- 2003년~현재 아주대학교 전자공학과 교수
- 2012년~현재 아주대학교 대학원 우주전자정보공학과 학과장



정해원

- 2014년 2월 아주대학교 전자공학 학사
- 2014년 3월~현재 아주대학교 우주전자공학 석사과정



김두환

- 1970년 2월 서울대학교 천문기상학 학사
- 1973년~1975년 일본 동경대학교 천체물리학 석사
- 1975년~1979년 일본 동경대학교 천체물리학 박사
- 1985년 1986년 국립천문대 대장
- 1986년 1988년 천문우주과학연구소 (현 한국천문연구원) 초대 소장
- 1990년~1992년 한국우주과학회 부회장
- 1990년~1994년 과학기술정책연구소 우주전문위원
- 2000년~2004년 국가우주개발전문(위)/ 위성체소위원회 위원장
- 2000년~2011년 아주대학교 우주계측정보공학과 주임교수
- 2011년~현재 아주대학교 우주전자정보공학과 연구교수