

바이스태틱 위성 SAR f-SCAN ATI 시스템에서 기하 모델로 인한 지향 오차 및 NESZ 손실 분석

Analysis of Pointing Error and NESZ Loss of Bistatic Satellite SAR f-SCAN ATI System Using a Geometry Model

김상태 · 김동현 · 김경록 · 최원석 · 한진영

Sangtae Kim · Donghyun Kim · Kyeongrok Kim · Wonseok Choi · Jinyoung Han

요약

본 논문에서는 HRWS(high-resolution wide-swath) 간섭계 영상을 획득하기 위한 바이스태틱 위성 SAR(synthetic aperture radar) f-SCAN ATI(along-track interferometry) 시스템의 지향 오차 및 NESZ(noise equivalent sigma zero) 영향을 개선하기 위해 개선된 기하 모델을 제안하고 이를 기반으로 시스템을 설계한다. 지향 오차로 인한 NESZ 영향을 분석하기 위해 위성 자세 설계를 제안하는 기하 모델과 구면 지구 모델로 설계한 값을 비교한다. 또한, 타이밍 설계, f-SCAN 빔 패턴 모사를 수행하여 제안된 기하 모델 기반 f-SCAN ATI 시스템을 설계한다. 원시 데이터 획득을 위한 신호의 송/수신 타이밍 및 유효대역폭 대 신호대역폭 비는 타이밍 설계에서 도출된다.

Abstract

In this study, a bistatic satellite synthetic aperture radar (SAR) f-SCAN along-track interferometry (ATI) system for acquiring high-resolution wide-swath (HRWS) interferometry was designed, and a geometry model was proposed to improve the effect of pointing error on noise equivalent sigma zero (NESZ). To analyze the effect of the pointing error on the NESZ, the satellite attitude computed using the proposed geometry model was compared with that obtained from the spherical earth model. In addition, the timing and f-SCAN beam pattern were calculated to design an frequency scanning along-track interferometry (f-SCAN ATI) system using the proposed geometry model. Transmit/receive timing and the ratio of effective bandwidth to transmit bandwidth were computed by the timing design.

Key words: SAR, HRWS, Bi-Static, f-SCAN, ATI

I. 서론

최근 위성 SAR 기술은 국방, 재난 및 재해 관리, 지질 관측, 도시 관리, 농업 등 다양한 분야에서 각광받으며 기

술 고도화를 위한 다양한 개념들이 연구되고 있다. 대표적으로 넓은 영역을 고해상도 영상으로 획득할 수 있는 HRWS 기술^{[1]-[10]}, 간섭계 영상 획득을 통해 DEM(digital elevation map) 제작 및 GMTI(ground moving indicator)를

한화시스템(Hanwha Systems)

· Manuscript received December 30, 2025 ; Revised January 2, 2026 ; Accepted April 13, 2026. (ID No. 20251230-160)

· Corresponding Author: Jinyoung Han (e-mail: jystory.han@hanwha.com)

위한 멀티스테틱 위성 기술이 있다^{[11]-[16]}.

대표적인 HRWS 기술은 MAPS(multiple azimuth processing scheme), SCORE(scan on receive), f-SCAN(frequency scanning) 기술이 있다^{[1]-[10]}. MAPS 기술은 방위방향으로 다수의 수신 채널을 구성하며, 낮은 PRF(pulse repetition frequency)로 원시 신호를 획득한다. 낮은 PRF로 동작하여 원시 신호를 획득하기 때문에 거리방향으로 넓은 영역을 관측할 수 있으며, 방위방향 DBF(digital beam-forming)으로 넓은 도플러 대역폭을 획득해 방위 고해상도를 달성할 수 있다^{[1]-[6]}. SCORE 기술은 고각 방향으로 다수의 수신 채널을 구성하여 높은 PRF에서 원시 신호를 획득한다. 높은 PRF로 동작하여 넓은 도플러 대역폭 획득이 가능하며, 거리 방향으로 DBF를 수행하여 블라인드 영역이 포함된 넓은 관측폭을 획득한다^{[1]-[7]}. f-SCAN 기술은 시간 지연선(TTDL, true time delay line)과 위상 천이기(PS, phase shifter)를 사용해 의도적으로 고각 방향 빔 분산을 형성해 반향 신호 수신 시간을 짧게 만든다. 짧아진 수신 시간으로 인해 비교적 높은 PRF로 넓은 거리 관측폭을 달성하며 동시에 방위 방향 해상도를 향상할 수 있다. f-SCAN 기술은 빔 분산을 사용함으로 인해 송신 신호 대역폭의 일부만이 거리 방향 해상도를 결정하게 되므로 거리 해상도가 trade-off 되는 단점이 있지만 MAPS, SCORE 기술에 비해 적은 전자부품으로 구현할 수 있다^{[8]-[10]}.

간접계 영상은 단일 위성으로 획득하는 방법과 다수의 위성으로 획득하는 방법이 있으나, 다수의 위성으로 획득하는 멀티스테틱 위성 SAR(multistatic satellite synthetic aperture radar)^{[11]-[16]} 시스템의 영상 활용 범위가 더 넓다. GMTI를 위한 간접계 영상은 두 기 이상의 위성이 서로 along-track 기선거리를 유지한 채 획득된다^[12]. 두 기의 복제 위성, TerraSAR-X와 TanDEM-X는 기선거리 250~1,000 m 수준에서 간접계 영상을 획득하고 있고^[17], RADiO 프로젝트에서는 기선거리 수~수십 km 수준의 간접계 영상 획득을 목표로 연구되고 있다^{[18]-[19]}. 바이스테틱 ATI는 주 위성과 동반 위성이 각각 서로 다른 스캔트 각을 가지며 복잡한 기하 관계를 만든다. 이처럼 along-track 및 cross-track 양방향으로 복잡한 기하 상황에서는 촬영 변수 설계 및 영상 품질 예측을 위해 정확한 기하 모델이 필요하다. 특히 바이스테틱 동작을 위한 위

성 자세 결정에 부정확한 스캔트 값은 지향 오차를 발생시킨다.

본 논문에서는 HRWS 간접계 영상을 획득하기 위한 바이스테틱 f-SCAN ATI 시스템의 지향 오차 및 성능 영향을 개선하기 위해 개선된 기하 모델을 제안하고 이를 기반으로 시스템을 설계한다. II장~IV장에서 케플러 궤도 모델^[20], WGS84 지오이드^[21] 및 편평 타원면 측지선 개념^[22]을 사용한 위성 기하 모델을 제안하고 신호 송/수신 변수를 설계한다. IV장에서는 참고 모델^[23]과 제안 모델에 따라 표적 지향을 위한 위성 자세를 결정하고 f-SCAN 패턴을 모사한다. V장에서는 위성 기하 모델에 따른 지향 오차 및 효과를 분석한다.

II. 모노스테틱 위성 SAR 기하 모사

2.1 기하 모사 방법

위성 SAR 기하는 크게 지구 주위를 공전하는 위성의 움직임과 지표상에 표적으로 구분하여 모사할 수 있다(그림 1). 표적은 정지 표적과 이동 표적으로 구분된다. 지구 자전 효과, 위성의 움직임, 표적의 위치, 표적의 움직임 등 복잡한 기하 관계를 모사하기 위해 그림 2와 같은 좌표계 계층 구조를 도입할 수 있다. 그림에서 하위 좌표계는 실선으로 연결된 상위 좌표계를 기준으로 정의된다. 어떤 하위 좌표계에서 표현된 위치는 식 (1)을 적용하여 상위 좌표계를 기준으로 표현될 수 있다. P , P' 는 각각 상위/하위 좌표계에서 표현된 임의의 위치이고 T 는 하위 좌표계에서 상위 좌표계로 전이 행렬을 의미하며 O

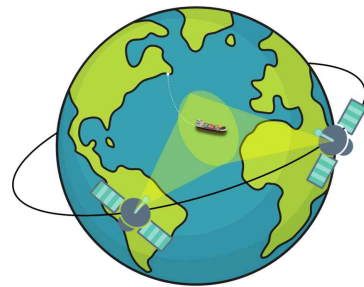


그림 1. 바이스테틱 위성 SAR 시스템 개념도
Fig. 1. Concept of bistatic satellite SAR system.

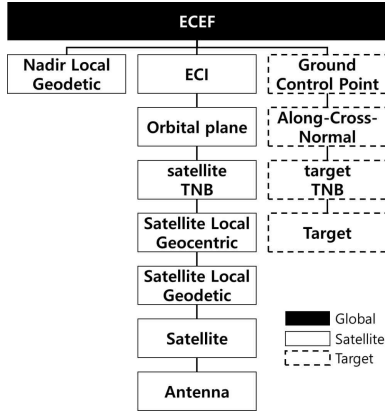


그림 2. 기하 모사를 위한 좌표계 계층 구조. 전역 좌표계(검정), 위성체 관련 지역 좌표계(실선), 표적 관련 지역 좌표계(점선).

Fig. 2. Frame hierarchy for geometry simulation. Global coordinate frame (black), local coordinate frame for satellite (solid line), local coordinate frame for target (dash line).

는 상위 좌표계에서 하위 좌표계 원점 위치를 의미한다.

$$P = TP + O. \quad (1)$$

그림 2는 기하를 모사하기 위한 좌표계 계층구조를 나타내고 있다. 각 좌표계의 정의는 표 1과 같다. 각 좌표계 정의에 따라 위성체 및 표적 관련 좌표계는 다음 순서로 계산한다.

위성 관련 좌표계 계산 순서

- 1) ECEF^[24] 좌표계를 기준으로 지구 자전 속도에 따른 ECI^[25] 좌표계 계산.
- 2) ECI 좌표계를 기준으로 근점 편각, 승교점 경도, 궤도 경사에 따라 케도면 좌표계 계산.
- 3) ORB 좌표계를 기준으로 케플러 법칙에 따라 위성 궤적을 모사하여 sTNB 좌표계 계산(Frenet-Serret 공식^[26] 적용).
- 4) sTNB 좌표계를 기준으로 SLC 좌표계 계산.
- 5) ECEF 좌표계를 기준으로 위성 위치에 따른 직하점에서 NLD 좌표계 계산(반복 계산법 적용).
- 6) SLC 좌표계를 기준으로 SLD 좌표계 계산.
- 7) SLD 좌표계를 기준으로 위성 자세에 따른 SAT 좌

표계 계산.

- 8) SAT 좌표계를 기준으로 ANT 좌표계 계산.

표적 관련 좌표계 계산 순서

- 1) ECEF 좌표계를 기준으로 기준 시각의 NLD 좌표계를 GCP 좌표계로 정의.
- 2) 표적 입사각 조건을 만족하는 표적 지표거리 및 방위 계산(반복 계산법 적용). 방위는 GCP 좌표계 xy 평면에서 정의.
- 3) GCP 좌표계를 기준으로 ACN 좌표계 계산(측지선 이론 적용).
- 4) ACN 좌표계를 기준으로 tTNB 좌표계 계산(Frenet-Serret 공식 방정식 적용)
- 5) tTNB 좌표계 기준으로 표적 좌표계 계산.

그림 3에 모노스태틱 위성 SAR 시스템 기하 모사 결과를 나타낸다. 위성체의 움직임은 SLD, NLD 좌표계로 표현된다. GCP 좌표계는 기준 시각에서 NLD 좌표계와 동일하며, 구면 지구 모델에 21개의 표적을 ACN 좌표계로 표현한다. 표적은 정지 표적으로서 시간에 따른 ACN 좌표계 변화는 없다. ECEF 좌표계에서 각 좌표계의 x축, y축, z축을 각각 초록색, 파란색, 붉은색으로 나타낸다.

2-2 모노스태틱 기하 모사 및 검토

$$\frac{R_e + H}{\sin\theta_i} = \frac{R_s}{\sin\theta_e} = \frac{R_e}{\sin\theta_t}. \quad (2)$$

$$\theta_i = \theta_t + \theta_e. \quad (3)$$

$$R_o = R_e \theta_e. \quad (4)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu_e}{R_e + H} - \frac{2\pi R_e}{24 \times 3,600 \times \cos\theta_{incl}}}. \quad (5)$$

$$v_g = v_s \frac{R_e}{R_e + H} \cos\theta_e. \quad (6)$$

표 1. 좌표계 정의

Table 1. Definition of local coordinate frames.

Frame	Reference frame	Origin	Axes	Remark
Earth-centered earth-fixed reference frame (ECEF)	Global	Earth's C.o.M	z-axis: CTP (conventional Terrestrial Pole) x-axis: Toward the intersect of the prime meridian and the equator	Time invariant
Nadir local geodetic frame (NLD)	ECEF reference frame	Sub-satellite point of satellite's C.o.M	z-axis: Toward satellite's C.o.M x-axis: Ground-projected satellite velocity vector	
Earth-centered inertial reference frame (ECI)	ECEF reference frame	Earth's C.o.M	z-axis: CTP (conventional Terrestrial Pole) x-axis: Toward the vernal equinox	
Orbital plane frame (ORB)	ECI reference frame	Earth's C.o.M	z-axis: Satellite orbital axis (normal to orbital plane) x-axis: Toward the periapsis	Time invariant
Satellite tangent normal binormal frame (sTNB)	ORB frame	Satellite's C.o.M	x-axis: Tangent to the orbit (satellite velocity vector) y-axis: Normal to the orbit (centripetal force vector)	
Satellite local geocentric frame (SLC)	sTNB frame	Satellite's C.o.M	z-axis: Toward earth's C.o.M x-axis: Parallel to the orbital plane (conservation of satellite orbital direction)	
Satellite local geodetic frame (SLD)	SLC frame	Satellite's C.o.M	z-axis: Toward sub-satellite point x-axis: Parallel to the orbital plane (conservation of satellite orbital direction)	
Satellite frame (SAT)	SLD frame	Reference point of satellite body	Depending on definition	
Antenna frame (ANT)	SAT frame	Reference point of antenna pattern	x-axis: Azimuth direction y-axis: Elevation direction	
Ground control point frame (GCP)	ECEF reference frame	Origin of NLD frame at reference time	z-axis: z-axis of NLD frame at reference time x-axis: x-axis of NLD frame at reference time	Time invariant
Along-track cross-track normal frame (ACN)	GCP frame	Target location on geoid	z-axis : Normal to geoid x-axis : Tangent to the geodesic, starting from origin and aligning with x-axis of GCP frame	
Target tangent normal binormal frame (tTNB)	ACN frame	Target's C.o.M	z-axis: Normal to geoid or Bi-normal to target trajectory x-axis: Tangent to the target trajectory (target velocity vector)	Equal to ACN frame in case of stationary target
Target frame (TAR)	tTNB frame	Reference point of target body	Depending on definition	

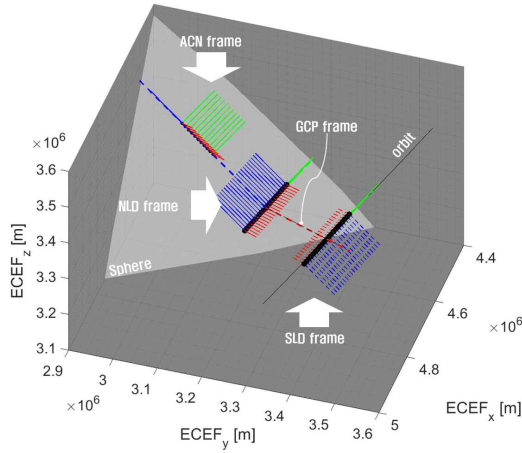


그림 3. 모노스태틱 위성 SAR 기하(제안 모델). x축(초록색), y축(파란색), z축(붉은색)

Fig. 3. Monostatic satellite SAR geometry (proposed). x-axis (green), y-axis (blue), z-axis (red).

$$v_r = \sqrt{v_s v_g} \quad (7)$$

$$R_s^2(\eta) = R_s^2(\eta = 0) + v_r^2 \eta^2 \quad (8)$$

$$\theta_{squint} = \text{asin}\left(\frac{v_g \eta}{R_s(\eta)}\right) \quad (9)$$

$$L_{\text{baseline}} = v_s \eta \quad (10)$$

스퀀트가 없는 위성의 SAR 기하를 검토하여 모사 알고리즘을 검증한다. $\eta=0$ 를 기준으로 표적의 위치를 모사하고, 시간에 따른 표적과 위성 간 기하 관계를 살펴본다. 기하 조건에 대한 상세는 표 2와 같다. 검증을 위한 위성 SAR 기하 모델은 식 (2)~식 (10)과 같다^[23]. R_e 는 지구 반지름, H 는 위성 고도를 의미한다. $\theta_i, \theta_e, \theta_l$ 는 각각 입사각, 지구 중심각, 관측각이다. 직하점으로부터 지표거리 R_g 는 원호의 길이가 된다. ECEF 좌표계에서 위성체 공전 속도 v_s 는 궤도 경사 θ_{incl} 에 따라 지구 자전을 고려하여 계산된다. μ_e 는 표준 중력 변수로 약 $3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ 값을 갖는다. v_g 는 지구 곡률을 고려한 지표 속도, v_r 는 유효 속도이다. 제안 모델에서 위성 속력은 GCP 좌

표 2. 모노스태틱 위성 SAR 기하 변수

Table 2. Monostatic satellite SAR geometry parameters.

Category	Parameter	Value
Time		-10 ~ 10 sec
Earth model	Sphere radius	6,378,137 m
	Earth's revolution per day	0
Orbit	Altitude	500,000 m
	Perigee	6,878,137 m
	Apogee	6,878,137 m
	True anomaly @ $\eta=0$	25°
	Argument of perigee	20°
	Longitude of ascending node	0°
	inclination	45°
Satellite	C.o.G	[0, 0, 0.5] m
Target	Incidence angle @ $\eta=0$	[20, 21, ..., 30]°
	Squint @ $\eta=0$	[0, 0, ..., 0]°
	Height	[0, 0, ..., 0] m

표계를 참조하여 계산된 위성의 변위로부터 계산되며, 지표 속력은 NLD 좌표계를 참조하여 계산된 표적의 지표 변위로부터 계산된다. 지표 변위는 측지선 이론으로 계산한다. 스퀀트 각은 bore-sight 방향과 표적 방향의 사이각으로 정의된다. 기선거리는 편위상 위성체 비행 거리로 계산한다. 그림 4 및 그림 5에 참고 모델과 제안 모델의 계산 결과를 비교한다. 참고 모델에서 위성의 속력은 경사 궤도 0°를 가정하여 계산되었다. 그림 4는 스퀀트가 없는 조건($\eta=0$)에서 위성과 표적의 기하 관계를 비교하고 있으며 제안 모델이 기존 모델과 잘 부합함을 보인다. 그러나, 스퀀트 상황에서 기하 변수는 두 모델 간 차이를 보인다(그림 5). 이러한 차이는 지구 자전과 WGS84 등 지오이드를 고려하면 더욱 심화할 수 있다.

III. 바이스태틱 위성 SAR 기하 모사 및 타이밍 설계

ATI 획득을 위한 바이스태틱 동작은 주 위성은 송/수신을 모두 하고, 동반 위성은 수신만 하도록 설계한다.

3-1 바이스태틱 위성 SAR 기하 모사

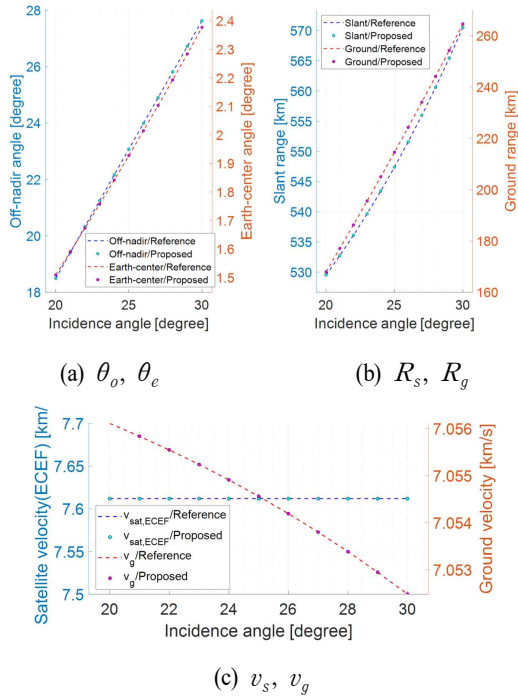


그림 4. 지구 자전이 없는 구형 지구 모델에서 zero-squint 기하 변수 비교
 Fig. 4. Comparison of satellite geometry parameters at zero-squint in sphere earth with no earth's rotation model.

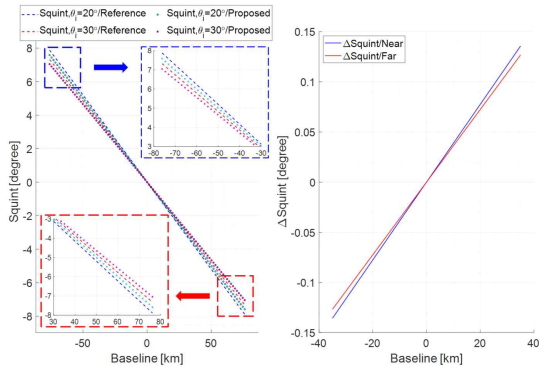


그림 5. 지구 자전이 없는 구형 지구 모델에서 기선거리에 따른 스퀀트 비교
 Fig. 5. Comparison of squint over baseline in sphere earth with no earth's rotation model.

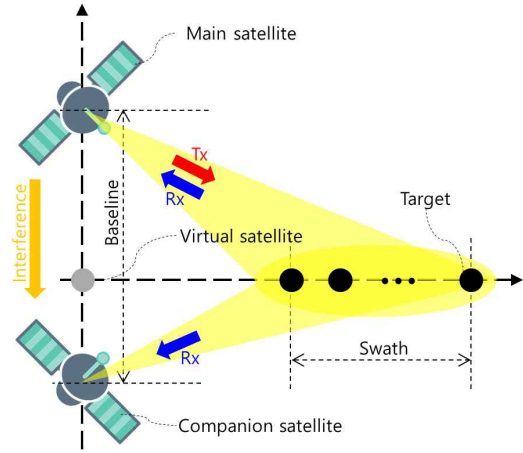


그림 6. 바이스테틱 위성 SAR ATI 시스템 개념도
 Fig. 6. Concept of bistatic satellite SAR ATI system.

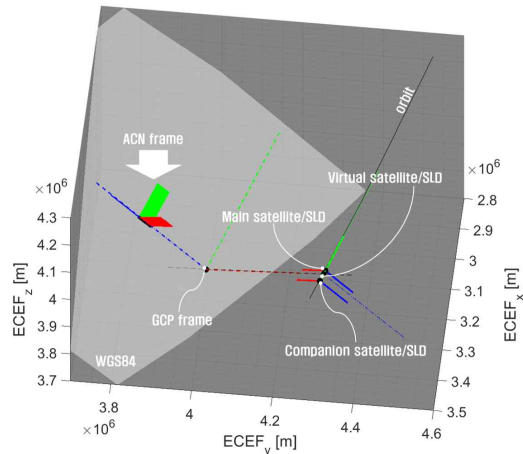


그림 7. 바이스테틱 위성 SAR 기하(제안 모델). x축(초록색), y축(파란색), z축(붉은색).
 Fig. 7. Bistatic satellite SAR geometry (proposed). x-axis (green), y-axis (blue), z-axis (red).

바이스테틱 위성 SAR 시스템 기하는 가상의 위성을 도입하여 모사할 수 있다(그림 6 및 그림 7). 그림 6에서 swath는 가상의 위성을 기준으로 설계된다. 이러한 방법은 주위성 및 동반위성의 안테나 footprint 정렬을 유리하게 한다. 또한, 가상의 위성은 기준 궤도를 결정할 수 있게 하며, 표적의 위치 및 거리/방위 방향을 결정하기 위한 GCP 좌표계를 결정할 수 있게 한다. 그림 7은 바이스테틱 위성 SAR 기하를 모사한 결과를 그림 6과 같은 방법

표 3. 바이스테틱 위성 SAR 변수
Table 3. Bistatic satellite SAR parameters.

Category	Paramter	Value	
Time		-1~1 sec	
Earth model	WGS84 semi-major axis radius	6,378,137 m	
	WGS84 semi-minor axis radius	6,356,725.314 m	
	Earth's revolution per day	1.0028	
Orbit	Altitude	500,000 m	
	Perigee	6,878,137 m	
	Apogee	6,878,137 m	
	True anomaly @ $\eta=0$	virtual	25°
		main	25.0833°
		companion	24.8334°
	Baseline	vir.-main.	10 km
		vir.-comp.	20 km
		main-comp.	30 km
	Argument of perigee	-10°	
Longitude of ascending node	45°		
Inclination	43.5°		
Satellite	C.o.G	[0, 0, 0.5] m	
	SAR antenna location	[0, 0, 1] m	
	Look	left	
Target	Incidence angle at swath center @ $\eta=0$	25°	
	Swath length	40 km	
	Height	0 m	
	Number of target	21 targets	
Resolution	Range	≤ 2 m	
	Azimuth	≤ 2 m	

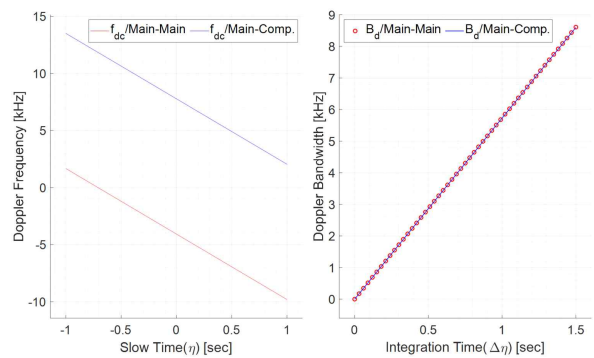
으로 표현한다. 바이스테틱 위성 SAR 기하 모사는 WGS84 모델이 적용되었다. 본 논문에서는 편의상 가상 위성, 주 위성, 동반 위성이 진근점 이각을 제외한 나머지 궤도 벡터 변수가 같도록 설정한다. 바이스테틱 위성 SAR ATI 시스템 설계 조건은 표 3과 같다.

각 좌표계 정의에 따라 바이스테틱 위성 SAR 좌표계를 계산하기 위한 순서는 다음과 같다.

바이스테틱 위성 SAR 좌표계 계산 순서

- 1) 가상 위성의 기하 모사.
- 2) 가상 위성의 기하를 기준으로 GCP 좌표계 계산.
- 3) $\eta=0$ 에서 가상의 위성 위치를 기준으로 입사각 25°가 되는 표적 위치 계산.
- 4) 3)에서 계산한 표적의 지표 거리 및 방위 계산(측지선 이론 적용).
- 5) 4)에서 계산한 방위와 동일한 방향으로 관측폭 40 km 내 등간격으로 표적 21개 모사.
- 6) $\eta=0$ 에서 가상의 위성 위치를 기준으로 기선거리 10 km가 되도록 주 위성 진근점 이각 계산(반복 계산법 적용).
- 7) 주 위성 기하 모사.
- 8) $\eta=0$ 에서 주 위성 위치를 기준으로 기선거리 30 km가 되도록 동반 위성 진근점 이각 계산(반복 계산법 적용).
- 9) 동반 위성 기하 모사.

모사한 위성 기하로부터 위성체 비행시간에 따른 위성체에서 표적으로 경사거리를 얻을 수 있고, 산출한 경사거리에서 도플러 주파수를 계산할 수 있다. 그림 8(a)에서 파란색 그래프는 주위성 송신 주위성 수신 경우에 대한 도플러 주파수이고, 붉은색 그래프는 주위성 송신 동반위성 수신 경우에 대한 도플러 주파수이다. ‘slow time’은 η



(a) 도플러 주파수 (a) Doppler frequency
(b) 도플러 대역폭 (b) Doppler bandwidth

그림 8. 바이스테틱 위성 SAR f-SCAN 도플러 프로파일 (표적 11, 제안 모델)

Fig. 8. Doppler profile of bistatic satellite SAR f-SCAN (target 11, proposed).

을 의미한다. 그림 8(b)는 각각의 경우에 대해 ‘integration time’에 따른 도플러 대역폭을 나타낸다. ‘integration time’은 방위 방향 펄스 압축 시간을 의미하며 $\Delta\eta$ 를 의미한다. 도플러 대역폭은 $\eta=0$ 을 중심으로 계산한다.

3-2 타이밍 설계

그림 6과 같이 주 위성은 송/수신을 하고 동반 위성은 수신만 하는 바이스테틱 위성 SAR f-SCAN 시스템 타이밍 설계는 동일 PRF 사용, 주 위성으로 직하 반향 신호의 간섭, 주 위성으로부터 동반 위성으로 간섭을 고려해야 한다. 관측 영역 반향 신호는 거리가 멀고 신호 세기가 R^4 에 반비례하여 감쇠하는 반면, 주 위성에서 동반 위성으로 간섭 신호는 거리가 가깝고 신호 세기가 R^2 에 반비례하여 감쇠하기 때문에 원시 신호 품질에 영향을 줄 수 있다. 세 조건을 충족하기 위한 타이밍 설계는 주 위성과 동반 위성이 각각의 조건을 만족하는 다수의 촬영 변수 세트를 찾아서, 각 세트의 교집합이 되는 세트를 최종 촬영 변수로 선정할 수 있다. 각 세트의 교집합은 PRF, 펄스폭, 유효대역폭 대 신호대역폭 비가 같은 세트들의 집합이 된다. 주 위성과 동반 위성 각각의 조건에 따른 촬영 변수는 f-SCAN 수신 개념에 따라 설계한다^[10]. 그림 8은 바이스테틱 위성 SAR f-SCAN 동작에서 송/수신 개념을 표현 한다. 주 위성은 스캔트 기하에서 모노스테틱 f-SCAN 동작과 동

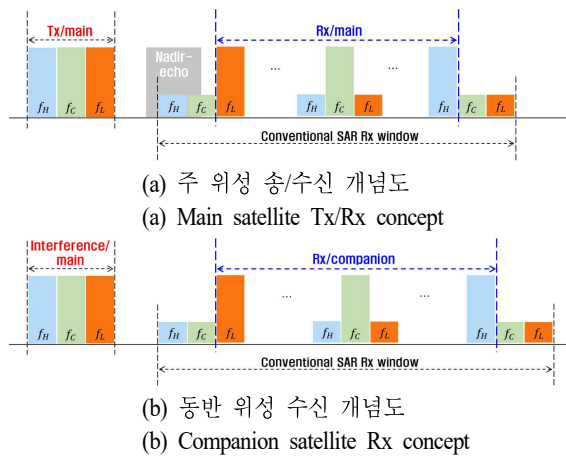


그림 9. 바이스테틱 위성 SAR f-SCAN 송/수신 개념도
Fig. 9. Concept of bistatic satellite SAR f-SCAN Tx/Rx.

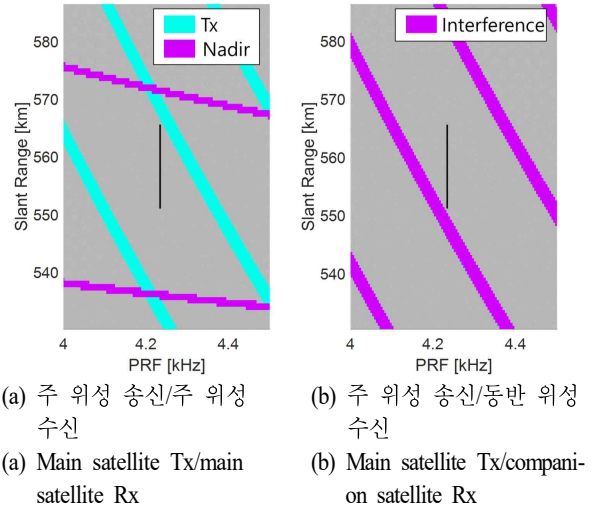


그림 10. 바이스테틱 위성 SAR f-SCAN 타이밍 다이어그램
Fig. 10. Bistatic satellite SAR f-SCAN timing diagram.

일하다(그림 9(a)). 동반 위성은 주 위성으로부터 간섭 신호를 회피하여 반향 신호를 수신한다(그림 9(b)). 간섭 신호는 PRI에 비해 짧은 시간에 동반 위성에도달하므로 기준 시각 오프셋을 도입하는 것이 타이밍 설계에 효과적이다. 제안하는 시스템에서 기선거리를 고려하여 동반 위성은 주 위성 대비 100 μ s 지연되어 동작하도록 설계되었다. 그림 10에 타이밍 설계 결과를 다이아몬드 다이어그램으로 표현한다. 세로축은 송신 경사거리와 수신 경사거리의 평균 경사거리를 의미한다. 주 위성 송신/수신의 경우 송신 신호와 직하 반향 신호의 간섭을 고려하여 타이밍 설계가 되었고(그림 10(a)), 주 위성 송신, 동반 위성 수신 경우 주 위성으로부터 간섭 신호만을 고려하여 타이밍 설계가 되었다(그림 10(b)). 두 경우 모두 PRF 4.233 kHz에서 동작하도록 설계되었다(표 4).

IV. 위성 자세 결정 및 f-SCAN 빔 설계

4-1 위성 자세 결정

$$P = T_{roll} T_{pitch} P \tag{11}$$

$$d = [d_x, d_y, d_z] \tag{12}$$

표 4. 바이스태틱 위성 SAR 타이밍 설계 결과
Table 4. Results of bistatic satellite SAR timing design.

Category	Paramter	Value
Main	PRF	4.233 kHz
	Pulse length	31.5 μ s
	Center frequency	9,800 MHz
	Transmit bandwidth	1,200 MHz
	Effective bandwidth	240 MHz
	Effective bandwidth to transmit bandwidth ratio	0.2
	Tx duty	13.336 %
	Rx duty	40.486 %
	Sampling window length	95.628 μ s
	Integration time	0.53 s
	Companion	PRF
Clock offset		100 μ s
Sampling window length		96.345 μ s
Rx duty		40.789 %
Integration time		0.53 s

$$\theta_{pitch} = \arctan\left(\frac{d_x}{d_z}\right) \quad (13)$$

$$\theta_{roll} = -\arcsin(d_y) \quad (14)$$

$$d = [v_o \eta, -R_o, H] \quad (15)$$

바이스태틱 위성 SAR ATI 시스템에서는 GCP 좌표계 y축과 주위성 고각 방향, 동반위성 고각 방향의 지표 정렬이 안테나 패턴 정렬을 위해 중요하다(그림 6). 안테나 패턴 정렬을 위해 두 위성 모두 Pitch-Roll 기동을 가정한다. Pitch-Roll 각은 기준 시각 $t=0$ 에서 측지 좌표계 기준 관측 영역 중심 방향으로부터 결정한다(식 (11)~식 (14)). 본 논문에서는 관측 영역 중심에 위치한 11번째 표적 방향을 기준으로 계산한다. T_{roll} , T_{pitch} 는 각각 pitch, roll 각에 대한 회전 행렬이다. d 는 표적 방향 벡터를 의미하고 θ_{pitch} , θ_{roll} 은 각각 pitch, roll 각을 의미한다. 표 5에 기하 모델에 따른 안테나 패턴 정렬을 위한 기준 방향과 그에 따른 위성 기동 각을 정리한다. 제안 모델은 3장에

표 5. 기하 모델에 따른 표적 방향 및 위성 자세
Table 5. Direction of target and satellite attitude according to geometry model.

Category	Paramter	Value	
Proposed	Baseline	Vir.-main	10 km
		Vir.-comp.	20 km
	Main satellite	Direction of target (target 11)	$[-0.0167, -0.3913, 0.9201]$
		Pitch angle	-1.0371°
		Roll angle	23.0376°
	Companion satellite	Direction of target (target 11)	$[0.0333, -0.3912, 0.9197]$
		Pitch angle	2.0735°
		Roll angle	23.0278°
	Reference	Baseline	Vir.-main
Vir.-comp.			20 km
Main satellite		Direction of target (target 11)	$[-0.0170, -0.3943, 0.9188]$
		Pitch angle	-1.0619°
		Roll angle	23.2218°
Companion satellite		Direction of target (target 11)	$[0.0340, -0.3941, 0.9184]$
		Pitch angle	2.1231°
		Roll angle	23.2111°

서 계산한 좌표계 계층 구조를 활용하여 위성 기동 각을 결정하고, 참고 모델은 식 (2)~식 (10)으로부터 바이스태틱 위성 기하를 모사하고 식 (15)로 표적 방향을 결정하여 위성 기동 각을 결정한다.

4-2 f-SCAN 빔 모사 방법 및 결과

f-SCAN 빔은 위상천이기와 시간지연선을 사용하여 형성할 수 있다(그림 11). 위상천이기는 주파수에 따른 빔지향 각을 다르게 하여 빔 분산을 만드는 역할을 하며, 시간지연선은 f-SCAN 빔 지향각을 보정하여 빔 조향으로 인한 이득 손실을 보상하는 역할을 한다. 따라서, 위상천이기와 시간지연선은 서로 반대 방향으로 빔을 조향한다. 그림 11(a) 및 그림 11(b)는 각각 위상천이기와 시간지연선의 빔 조향 방향에 따라 최종 형성되는 f-SCAN 빔의 특성을 보여준다.

$$\phi_n = ky_n \sin(\epsilon_{bs}(f)) \quad (16)$$

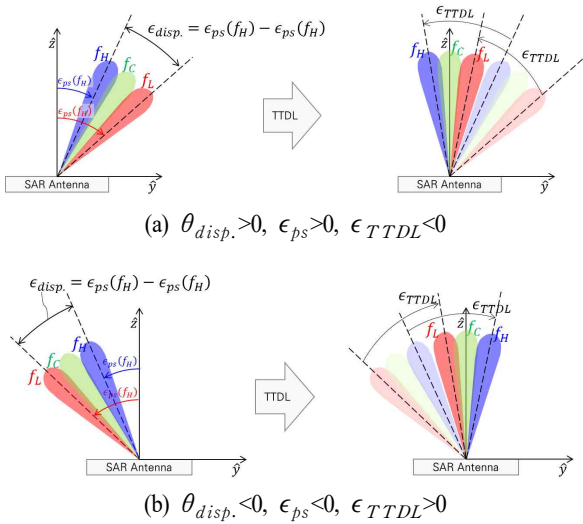


그림 11. f-SCAN 빔 형성 개념도
Fig. 11. f-SCAN beamforming concept.

$$\omega\tau_n = ky_n \sin(\epsilon_{TTDL}) \quad (17)$$

$$\phi_n + \omega\tau_n = ky_n \sin(\epsilon(f)) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{TTDL} &= \arcsin\left(\frac{2f_c}{B_{eff} - B_{tx}} \sin\frac{\theta_{disp.}}{2} \cos\theta_{pointing}\right) \\ &+ \cos\frac{\theta_{disp.}}{2} \sin\theta_{pointing} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{ps}(f_c) &= \arcsin\left(\frac{1}{2f_c} \left(\sin\epsilon_H(f_c + \frac{B_{tx} - B_{eff}}{2})\right.\right. \\ &+ \left.\left.\sin\epsilon_L(f_c - \frac{B_{tx} - B_{eff}}{2})\right)\right) \\ &- \sin\epsilon_{TTDL} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_H &= \epsilon_{TTDL} + \epsilon_{ps}(f_c + \frac{B_{tx} - B_{eff}}{2}) \\ &= \theta_{pointing} - \frac{\theta_{disp.}}{2} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_L &= \epsilon_{TTDL} + \epsilon_{ps}(f_c - \frac{B_{tx} - B_{eff}}{2}) \\ &= \theta_{pointing} + \frac{\theta_{disp.}}{2} \end{aligned} \quad (22)$$

$$f = \frac{f_c \sin\epsilon_{ps}(f_c)}{\sin\epsilon_{TTDL} - \sin(\epsilon(f))} \quad (23)$$

식 (16) 및 식 (17)은 각각 위상천이기와 시간지연선의 빔 조향 특성을 나타낸다. 위상천이기는 주파수에 따라서 서로 다른 빔 조향각 특성을 갖지만, 시간지연선은 주파수에 무관한 빔 조향각을 갖는다. 식 (18)은 위상천이기와 시간지연선을 모두 사용하는 경우 빔 조향 특성이며, $\epsilon(f)$ 는 주파수에 따른 빔 조향각, y_n 은 배열 소자의 고 각 방향 위치이다. $\phi_n, \omega\tau_n$ 은 각각 위상천이기와 시간지연선의 위상 응답 특성을 나타낸다. 식 (19) 및 식 (20)에 따라 위상천이기와 시간지연선을 동작시킴으로써 f-SCAN 빔을 형성할 수 있다. $\epsilon_{ps}(f_c)$ 는 중심주파수에서 위상천이기 조향각이다. $\theta_{disp.}$ 은 목표하는 빔 분산량, $\theta_{pointing}$ 는 f-SCAN 빔 지향각, f_c 는 중심주파수, B_{tx} 는 신호대역폭, B_{eff} 는 유효대역폭을 의미한다. ϵ_H, ϵ_L 은 각각 고주파 및 저주파에서 빔 지향 각이다(식 (21) 및 식 (22)). 본 논문에서 SAR 위성은 좌측 관측을 하므로(표 3), 고주파수로 먼 곳을 보고 저주파수로 가까운 곳을 보기

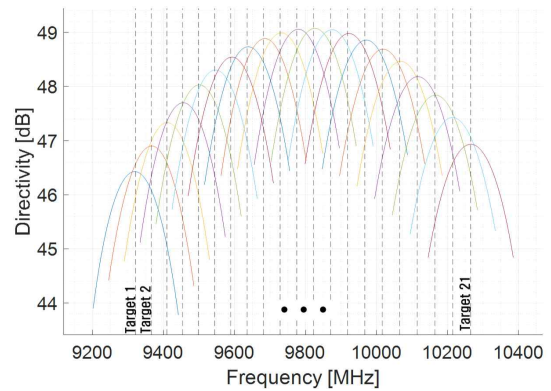


그림 12. 모사한 f-SCAN 빔 지향성. 왼쪽 곡선부터 오른쪽으로 표적 1~21번. 세로 점선은 각 표적별 중심주파수

Fig. 12. Simulated f-SCAN beam directivity. From leftmost curve to the rights targets 1 through 21. Vertical dash lines are center frequencies to each target.

위해 식 (21) 및 식 (22)와 같이 설계한다. 식 (23)은 관측 각에 따른 중심주파수를 나타낸다. 본 논문에서는 고도 500 km에서 관측폭 40 km를위해 빔 분 산량 $\theta_{disp.} = -3.794^\circ$, $\theta_{borne} = 0^\circ$ 로 f-SCAN 빔을 형성한다. 신호대역폭 및 유효대역폭은 표 4와 같다. $\epsilon_{ps}(f_c = 9.8 \text{ GHz})$, ϵ_{TTDL} 값은 각각 42.3929° , -42.5188° 로 계산되었다. 그림 12는 모사한 f-SCAN 빔 패턴을 보여준다. spectral shaping loss^[10]을 고려하여 f-SCAN 빔은 위성에서 가까운 지점에 낮은 주파수 패턴이 위치하도록 한다.

V. 빔 지향 오차 영향

II ~ IV장에서 바이스태틱 위성 SAR f-SCAN ATI 시스

템을 설계하고 기하 모델이 위성 자세 결정에 주는 영향을 보았다. V장에서는 위성 자세에 따른 integration loss^[10] 및 spectral shaping loss^[10]를 비교한다.

5-1 안테나 지향 특성

위성 자세에 따른 안테나 지향 특성은 그림 13(a) 및 그림 13(b), 그림 14(a) 및 그림 14(b)와 같다. 참고 모델의 경우 실제 필요한 조향각보다 더 많은 기동을 하면서 열화된 표적 지향 성능을 보인다. 이러한 표적 지향 오차는 integration loss 및 spectral shaping loss를 크게 만든다.

5-2 안테나 패턴 손실

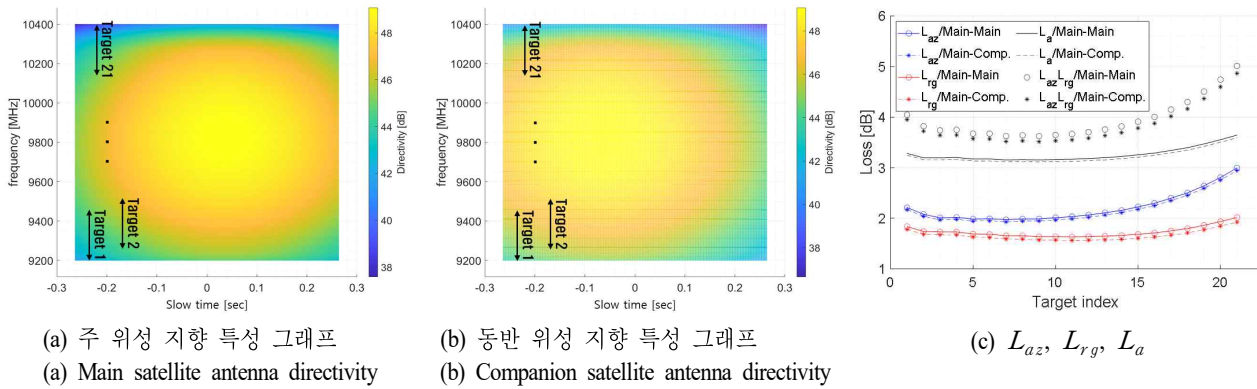


그림 13. 참고 모델 지향 특성 및 NESZ 영향

Fig. 13. Pointing characteristics and effect on NESZ (reference).

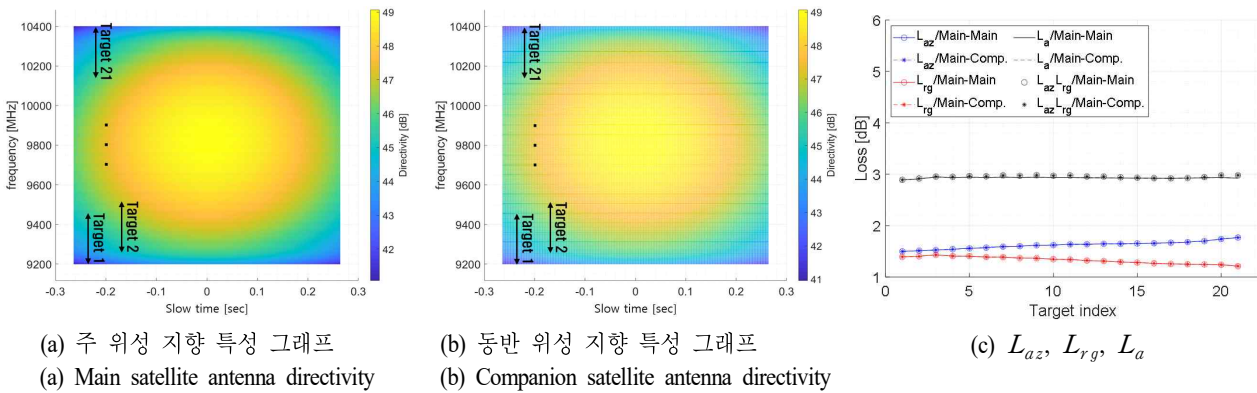


그림 14. 제안 모델 지향 특성 및 NESZ 영향

Fig. 14. Pointing characteristics and effect on NESZ (proposed).

$$L_{az}^{-1} = \frac{\int W_{az}(f_d; B_d) \overline{D^2}(f = f_c, f_d) df_d}{\int W_{az}(f_d; B_d) df_d} \quad (24)$$

$$L_{rg}^{-1} = \frac{\int W_{rg}(f; B_{eff}) \overline{D^2}(f, f_d = f_{dc}) df}{\int W_{rg}(f; B_{eff}) df} \quad (25)$$

$$L_a^{-1} = \frac{\iint W_{az} W_{rg} \overline{D^2}(f, f_d) df df_d}{\iint W_{az} W_{rg} df df_d} \quad (26)$$

안테나 패턴으로 인한 손실은 크게 방위 방향과 거리 방향 손실로 구분할 수 있다(식 (24) 및 식 (25)). 방위방향 손실 혹은 integration loss는 방위 방향 안테나 패턴이 원인이 되며, 거리방향 손실 혹은 spectral shaping loss는 안테나 패턴 주파수 응답 특성이 원인이 된다. 식 (26)은 안테나 패턴으로 인한 손실의 일반적인 표현이다. 안테나 패턴으로 인한 손실은 신호 대역폭과 도플러 대역폭에 대한 식으로써 해상도에 따라 달라질 수 있다(식 (24)~식 (26)). W_{az} , W_{rg} 는 각각 방위, 거리 윈도우를 의미한다. 본 논문에서는 윈도우를 적용하지 않는다($W=1$). $\overline{D^2}$ 는 정규화 two-way

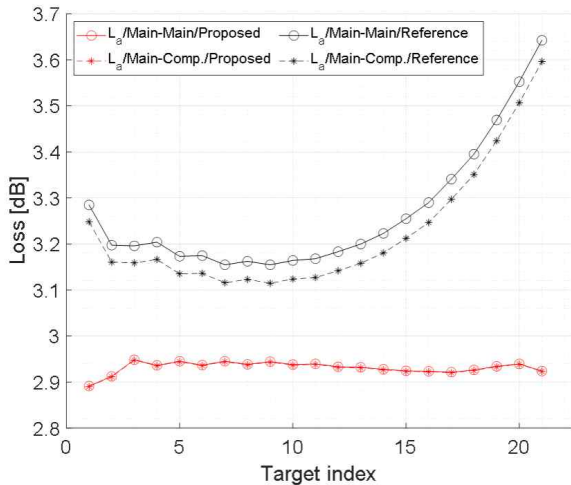
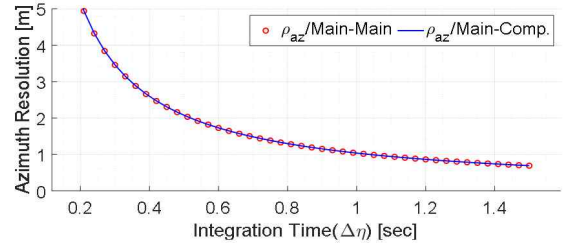
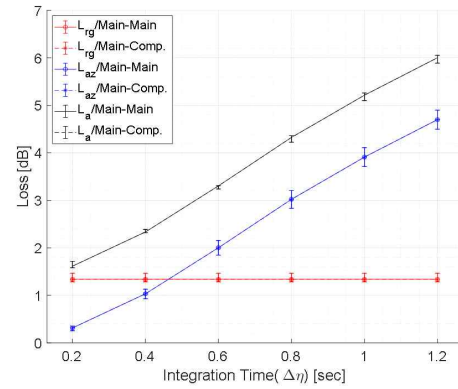


그림 15. 위성 기하 모델에 따른 L_a 비교. 참고 모델(검정색), 제안 모델(붉은색).
Fig. 15. Comparison of L_a according to satellite geometry model. Reference (black). Proposed (red).

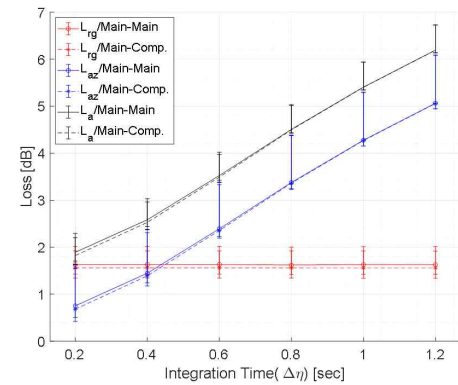
지향성을 의미한다. 기하 모델에 따른 L_{az} , L_{rg} , L_a 를 그림 13(c) 및 그림 14(c)에 정리한다. 그림에서 Integration loss 및 spectral shaping loss를 각각 계산하는 방법으로 안테나



(a) Integration time에 따른 방위 해상도
(a) Azimuth resolution over integration time



(b) Integration time에 따른 L_{az} , L_{rg} , L_a (제안 모델)
(b) L_{az} , L_{rg} and L_a over integration time (proposed)



(c) Integration time에 따른 L_{az} , L_{rg} , L_a (참고 모델)
(c) L_{az} , L_{rg} and L_a over integration time (reference)

그림 16. 방위 해상도에 따른 손실 비교
Fig. 16. Comparison of loss according to azimuth resolution.

패턴으로 인한 손실을 과대평가하고 있음이 확인된다($L_a < L_{az}L_{rg}$). 그림 15는 기하 모델에 따른 L_a 를 비교한다.

5-3 방위 해상도와 L_a 관계

$$\rho_{az} = 0.886 \times \frac{v_g}{B_d} \quad (27)$$

그림 16은 방위 해상도에 따른 손실을 나타낸다. 방위 압축 시 윈도우를 적용하지 않고 H/W 특성으로 인한 해상도 열화가 없는 이상적인 경우 방위 해상도는 지표 속도 v_g 와 도플러 대역폭 B_d 로 표현된다^[23](식 (27)). 식 (27)에 따라 integration time이 증가할수록 도플러 대역폭이 증가하여 고해상도 영상을 얻을 수 있다. 하지만, 식 (24) 및 식 (25)로 인해 integration loss가 증가한다(그림 16(b) 및 그림 16(c)). 그림 16(b) 및 그림 16(c)에서 세로 막대는 관측폭 내에서 L_{az} , L_{rg} , L_a 의 범위를 나타낸다.

VI. 결 론

본 논문에서는 바이스태틱 위성 SAR f-SCAN ATI 시스템을 고도 500 km, 관측폭 40 km, 해상도 2 m, X-대역 및 기선거리 30 km 조건에서 설계하고, 기하 모델에 따른 지향 오차 효과를 분석했다. 기하 모델에 따른 지향 특성은 거리 방향 보다 방위 방향으로 두드러지게 나타났다. 바이스태틱 시스템에서 지향 오차는 주 위성과 동반 위성의 안테나 footprint를 정렬하지 못하고, 유효 신호 전력을 열화시켜 추가적인 NESZ 혹은 SCR(signal-to-clutter ratio), CNR(clutter-to-noise ratio) 손실이 발생함을 분석했다. 위상 간섭계(phase interferometry) 기술을 사용하는 바이스태틱 시스템에서 SCR, CNR은 간섭계 성능을 결정하는 주요 변수다^[27]. 본 논문에서 위성 자세 결정에 기하 모델에 따라 신호 전력 손실과 거리에 따른 지향 오차 손실 경향이 악화되는 것을 보였다. 따라서, 적합한 방법으로 위성 자세를 결정함으로써 바이스태틱 시스템의 간섭계 성능 향상에 기여할 수 있다.

References

- [1] G. Krieger, S. Huber, M. Villano, F. Q. de Almeida, M. Younis, and P. López-Dekker, et al., "SIMO and MIMO system architectures and modes for high-resolution ultra-wide-swath SAR imaging," in *EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Hamburg, Jun. 2016, pp. 187-192.
- [2] J. H. Kim, M. Younis, P. Prats-Iraola, M. Gabele, and G. Krieger, "First spaceborne demonstration of digital beamforming for azimuth ambiguity suppression," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 1, pp. 579-590, Jan. 2013.
- [3] N. Gebert, G. Krieger, and A. Moreira, "Multichannel azimuth processing in ScanSAR and TOPS mode operation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 7, pp. 2994-3008, Jul. 2010.
- [4] D. Giudici, P. Guccione, M. Manzoni, A. M. Guarnieri, and F. Rocca, "Compact and free-floating satellite MIMO SAR formations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, p. 1000212, Mar. 2021.
- [5] P. Guccione, A. M. Guarnieri, F. Rocca, D. Giudici, and N. Geber, "Along-track multistatic synthetic aperture radar formations of minisatellites," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 1, p. 124, Jan. 2020.
- [6] W. Tan, W. Xu, P. Huang, Z. Huang, Y. Qi, and K. Han, "Investigation of azimuth multichannel reconstruction for moving targets in high resolution wide swath SAR," *Sensors*, vol. 17, no. 6, p. 1270, Jun. 2017.
- [7] N. Gebert, G. Krieger, and A. Moreira, "Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 2, pp. 564-592, Apr. 2009.
- [8] C. Roemer, "Introduction to a new wide area SAR mode using the F-SCAN principle," in *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, Fort Worth, TX, Jul. 2017, pp. 3844-3847.
- [9] C. Roemer, R. Gierlich, J. Marquez-Martinez, and M. Notter, "Frequency scanning applied to wide area SAR im-

- aging," in *EUSAR 2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, Jun. 2018.
- [10] P. Guccione, D. Mapelli, D. Giudici, and A. R. Persico, "Design of f-SCAN acquisition mode for synthetic aperture radar," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 20, p. 5283, Oct. 2022.
- [11] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, "Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no. 5, pp. 857-872, May 2007.
- [12] K. Marais, R. Sedwick, "Space based GMTI using scanned pattern interferometric radar(SPIR)," in *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings(Cat. No. 01TH8542)*, Big Sky, MT, Mar. 2001.
- [13] G. Krieger, A. Moreira, "Multistatic SAR satellite formations: Potentials and challenges," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seoul, Jul. 2005, pp. 2680-2684.
- [14] G. Krieger, A. Moreira, "Spaceborne bi- and multistatic SAR: Potential and challenges," *IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, vol. 153, no. 3, Jun. 2006.
- [15] T. Kraus, G. Krieger, M. Bachmann, and A. Moreira, "Spaceborne demonstration of distributed SAR imaging with TerraSAR-X and TanDEM-X," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, pp. 1731-1735, Nov. 2019.
- [16] Y. G. Kang, S. Park, E. Kim, J. U. Lee, K. Kim, and S. Kim, "Ground-moving target indication using along-track SAR interferometer designed with triangular frequency-modulated continuous wave radar," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, p. 8502512, Feb. 2025.
- [17] J. H. González, J. M. W. Antony, M. Bachmann, G. Krieger, M. Zink, and D. Schrank, et al., "Bistatic system and baseline calibration in TanDEM-X to ensure the global digital elevation model quality," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 73, pp. 3-11, Sep. 2012.
- [18] M. Kleinherenbrink, P. López-Dekker, F. Nouguier, and B. Chapron, "Bistatic SAR mapping of ocean-wave spectra," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, p. 4205812, Apr. 2024.
- [19] A. Gigantino, A. Renga, M. D. Graziano, C. Abbundo, F. Ravellino, and A. Moccia, et al., "Long-baseline multistatic and bistatic SAR products: Application to the RODiO mission," *Acta Astronautica*, vol. 222, pp. 314-324, Sep. 2024.
- [20] P. Colwell, *Solving Kepler's Equation over Three Centuries*, Richmond, VA, Willmann-Bell, 1993.
- [21] Defense Mapping Agency (DMA), "Department of defense world geodetic system 1984," Fairfax, VA, DMA, DMA TR 8350.2, 2nd ed. Sep. 1991.
- [22] T. Vincenty, "Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations," *Survey Review*, vol. 23, no. 176, pp. 88-93, Apr. 1975.
- [23] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [24] A. Leick, *GPS Satellite Surveying*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2004.
- [25] G. Petit, B. Luzum, eds., "IERS conventions(2010)," Frankfurt am Main, International Earth Rotation and Reference Systems Service(IERS), IERS Technical Note No. 36, Dec. 2010.
- [26] V. A. Toponogov, V. Y. Rovenski, *Differential Geometry of Curves and Surface*, Boston, Birkäuser, 2006.
- [27] X. Wang, G. Gao, S. Zhou, and Y. Zhu, "Performance comparison and assessment of displaced phase center antenna and along-track interferometry techniques used in synthetic aperture radar-ground moving target indication," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, p. 083504, Dec. 2014.

김 상 태 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-9351-5103>



2018년 8월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)

2019년 12월~2022년 8월: 국방과학연구소 연구원

2022년 8월~현재: 한화시스템 선임연구원

[주 관심분야] Microwave, Antenna System, Optimisation, Satellite SAR, System Engineering 등

최 원 석 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0009-0002-4407-248X>



2022년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2023년 4월~현재: 한화시스템 연구원
[주 관심분야] 영상레이다, SAR탐재체 종합, 디지털 신호처리 등

김 동 현 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9085-5509>



2024년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2024년 2월~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 영상 레이더, 능동위상배열 안테나, 반사판 안테나 등

한 진 영 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-3544-0085>



2001년 2월: 경희대학교 전자전파공학부 (공학사)

2007년 12월~2015년 3월: 삼성탈레스 연구원(레이더 시스템)

2015년 4월~2016년 6월: 한화탈레스 선임연구원

2006년 6월~현재: 한화시스템 수석연구원

[주 관심분야] Microwave, Antenna System, SAR Digital HW, Satellite SAR, System Engineering 등

김 경 록 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3552-2365>



2022년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)

2022년 2월~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 영상레이더, SAR탐재체 종합, 디지털 신호처리 등