

광역관측 운용 모드에 대한 Quad-pol SAR 시스템의 성능 분석

Performance Analysis of Quad-pol SAR System for Wide-Swath Operation Mode

임정환 · 윤성식* · 이재욱 · 이택경 · 유상범** · 이현철** · 이상규**

Jung-Hwan Lim · Seong Sik Yoon* · Jae-Wook Lee · Taek-Kyung Lee ·
Sang-Burm Ryu** · Hyeon-Cheol Lee** · Sang-Gyu Lee**

요 약

본 논문에서는 광역관측 운용 모드에 대한 Quad-pol SAR 시스템의 성능을 분석하고, 단일편파 시스템과의 비교 및 각 운용 모드 사이의 비교를 수행하고자 한다. SAR 위성의 짧은 재방문 주기를 위해서는 넓은 영역을 관측해야 하며, 이를 위한 SAR 운용 모드로 ScanSAR와 SweepSAR가 있다. 일반적으로 Quad-pol SAR 시스템은 관측 대상의 정보를 단일 편파를 사용할 때보다 다양하게 얻을 수 있지만 시스템 성능 변수들에 영향을 주므로 이러한 영향을 분석할 필요가 있다. 광역관측 Quad-pol SAR 시스템의 성능 분석 결과로부터 목표 성능을 만족시키기 위한 시스템 변수와 적합한 운용 모드를 선정할 수 있다.

Abstract

In this study, we propose a performance analysis of a quadrature-polarimetric(quad-pol) synthetic aperture radar(SAR) system for wide-swath operation mode and compare it with a single-pol system based on the operation mode. To achieve a shorter revisit time for an SAR satellite, we must observe a wide area, and two SAR operation modes exist for this purpose, which are called ScanSAR and SweepSAR. In general, a quad-pol SAR system can obtain a greater variety of information about a target than a single-pol system. Because this system affects system performance parameters, analyzing these effects is required. Based on a performance analysis of the wide-swath quad-pol SAR system, the system parameters and appropriate operation mode can be selected to satisfy the performance requirements.

Key words: Synthetic Aperture Radar, Wide-Swath, Quad-pol, Ambiguity to Signal Ratio, Resolution

I. 서 론

합성 개구면 레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR)는

전파를 활용하여 고해상도 영상을 얻을 수 있는 능동 센서이며, 영상 레이더로도 불린다. SAR는 위성, 항공기 등에서 활용이 되며, 주·야 무관한 전천후 지상 관측을 가

†이 연구는 2018년도 한국항공우주연구원 연구비의 지원으로 연구되었음.

‡이 연구(논문)는 과학기술정보통신부 지원으로 수행하는 한국항공우주연구원의 차세대 영상레이더 탑재체 핵심기술개발의 일환으로 수행되었음.

한국항공대학교 항공전자정보공학부(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

*한화시스템 영상레이더팀(Imaging Radar Team, Hanwha Systems)

**한국항공우주연구원 탑재체전자팀(Payload Electronics Team, Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received November 19, 2018 ; Revised December 29, 2018 ; Accepted February 18, 2019. (ID No. 20181119-118)

· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

능하게 한다. 위성에서 활용되는 SAR는 짧은 재방문 주기를 활용하여 넓은 범위를 관측할 필요가 있지만^[1], 위성용 SAR는 송신 펄스의 펄스 반복 주기(pulse repetition frequency: PRF)와 펄스 폭에 따라 발생하는 블라인드 거리(Blind range)로 인해 관측 폭을 설정하는데 제한이 있다. ScanSAR(Scanning Synthetic Aperture Radar) 방식은 이를 극복하기 위한 광역관측 SAR 운용 모드로, 관측하고자 하는 전체 관측 폭을 여러 부관측폭으로 나누고, 부관측폭마다 PRF를 다르게 하여 순차적으로 관측함으로써 블라인드 거리를 회피하는 방법이다^[2]. ScanSAR는 표적의 위치에 따라 진폭 변조가 발생하는 스칼러핑(scalloping) 문제가 있으며, 이를 개선하기 위한 방식으로는 SAR 시스템 플랫폼의 진행방향과 같은 방향으로 빔 조향을 하는 TOPS(Terrain Observation by Progressive Scan) 모드가 있다^[3]. 그러나 이와 같이 관측 폭을 나누는 방식은 부관측폭 수가 증가함에 따라 관측 영역에 대한 관측 시간이 감소하기 때문에 해상도가 악화되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하는 고해상도 광역관측을 위한 방식으로는 SCORE(SCan On REceiver) 방식을 기반으로 하는 SweepSAR 모드가 있다^[4]. 그러나 SweepSAR 방식은 블라인드 거리를 피하기 위해 PRF를 낮춰야 하며, 이로 인해 안테나의 방위방향 길이가 증가해야 한다.

단일편파(single-polarimetric)란 수평(H) 또는 수직(V) 편파 중 하나만을 송·수신에 사용하여 HH 또는 VV 신호를 얻는 방식을 의미하며, Quad-pol(Quadrature-polarimetric)이란 수평 및 수직 편파를 모두 송·수신에 사용하여 HH, HV, VH, VV 네 종류의 신호를 얻는 방식을 의미한다. 한 가지 종류의 송·수신 편파를 사용하여 관측 대상의 크기 정보를 바탕으로 영상을 얻는 단일편파 SAR 시스템과 달리 PolSAR(polarimetric SAR)는 다양한 송·수신 편파에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 Full polarimetric SAR, 즉 Quad-pol SAR는 네 종류의 송·수신 편파 HH, HV, VH, VV의 영상으로부터 많은 정보를 얻을 수 있으며, 이를 바탕으로 다양한 분야에 활용되고 있다^{[5][6]}. 이와 같은 Quad-pol SAR의 활용이 증대해감에 따라 Quad-pol SAR 시스템 분석의 중요성이 높아지고 있으며, 국외에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[7][8]}.

본 논문의 2장에서는 SAR 시스템 변수와 SAR 시스템

성능 사이의 관계를 알아보고, 광역관측 SAR 운용 모드인 ScanSAR와 SweepSAR 모드의 성능을 단일편파 시스템에서 분석하고자 한다. 이후 3장에서 Quad-pol을 사용하기 위한 SAR 시스템의 필요사항 및 특징을 살펴보고, 광역관측 운용 모드의 Quad-pol SAR 활용에 대한 시스템 성능을 분석할 것이며, 4장에서는 각 운용 모드에 대해 단일편파 SAR 시스템과 Quad-pol SAR 시스템 성능을 비교 및 분석하였다.

II. 광역관측 단일편파 SAR 시스템 성능 분석

2-1 SAR 시스템 성능 변수

SAR 시스템의 성능을 결정하는 것으로서 모호성 비, 해상도와 같은 지표가 있으며, 이러한 성능 지표들은 SAR 센서로부터 획득하는 영상의 품질을 결정한다. 모호성 비란 원하는 신호 대비 원하지 않은 신호들의 비를 의미하며, 서로 다른 펄스 간 수신 타이밍 일치로 인해 발생하는 거리방향 모호성 비(range ambiguity ratio: RAR)와 SAR 센서의 진행방향으로의 유한한 샘플링에 의해 발생하는 방위방향 모호성 비(azimuth ambiguity ratio: AAR)가 있다^{[9]~[12]}. 모호성 비는 식 (1)~식 (2)와 같이 송·수신 안테나 패턴 G_t 와 G_r , 경사 거리 ρ , 입사각 θ_I , 도플러 신호처리 대역폭 PB(processing bandwidth), 거리방향과 방위방향에 대해 모호성 신호가 발생하는 각도 θ_A , θ_{AZ} 를 통해 계산된다^[13].

$$RAR = \frac{\sum_{n \neq 0} \frac{G_t(\theta_A(n))G_r(\theta_A(n))}{\rho_{RA}^3(n)\sin(\theta_I(n))}}{\frac{G_t(\theta_A(0))G_r(\theta_A(0))}{\rho^3\sin(\theta_I)}} \quad (1)$$

$$AAR = \frac{\sum_{n \neq 0} \int_{PB} G_t(\theta_{AZ}(n))G_r(\theta_{AZ}(n))d\theta_{AZ}(n)}{\int_{PB} G_t(\theta_{AZ}(0))G_r(\theta_{AZ}(0))d\theta_{AZ}(0)} \quad (2)$$

해상도란 인접한 목표물을 분리하여 파악할 수 있는 정도를 나타내며, 거리방향에 대한 해상도 ρ_r 와 방위방향에 대한 해상도 ρ_a 는 식 (3) 및 식 (4)와 같이 빛의 속도 c , 송신 펄스의 FM비 K_r , 송신 펄스 폭 T_r , beam footprint

속도 V_g , 스핀드 각 $\theta_{r,c}$, broadening factor $\gamma_{w,a}$, 도플러 대역폭 Δf_{dop} 를 바탕으로 계산할 수 있다^[14].

$$\rho_r = \frac{c}{2} \frac{1}{|K_r| T_r} \quad (3)$$

$$\rho_a = \frac{0.886 V_g \cos \theta_{r,c}}{\Delta f_{dop}} \gamma_{w,a} \quad (4)$$

이때 Δf_{dop} 는 위성의 속도 V_s , 안테나 빔폭 θ_{bw} , 송신 파장 λ 로부터 식 (5)의 형태를 가지며, 식 (4) 및 식 (5)에 따라서 방위방향 해상도는 위성의 경우 근사적으로 식 (6)이 된다.

$$\Delta f_{dop} = \frac{2 V_s \cos \theta_{r,c}}{\lambda} \theta_{bw} \quad (5)$$

$$\rho_a = \frac{0.886 \lambda}{2 \theta_{bw}} \frac{V_g}{V_s} \gamma_{w,a} \approx \frac{0.443 \lambda}{\theta_{bw}} \quad (6)$$

해상도는 각 방향의 신호의 대역폭에 의존적이다. 거리방향 해상도의 경우는 송신 신호의 대역폭 $|K_r| T_r$ 이 영향을 미치며, 거리방향 해상도는 지표에 대한 해상도로 바꾸기 위해서는 $\sin \theta_l$ 만큼 나눠져야 한다. 방위방향 해상도의 경우는 SAR 시스템 플랫폼의 이동으로 인한 도플러 효과로 발생하는 신호의 대역폭인 Δf_{dop} 가 영향을 미친다. 방위방향 해상도는 안테나의 크기와 빔폭 사이의 관계를 바탕으로 안테나의 방위방향 길이 L 에 대하여 $\rho_a = L/2$ 의 관계로 파악할 수 있다.

2-2 C 대역 ScanSAR 시스템

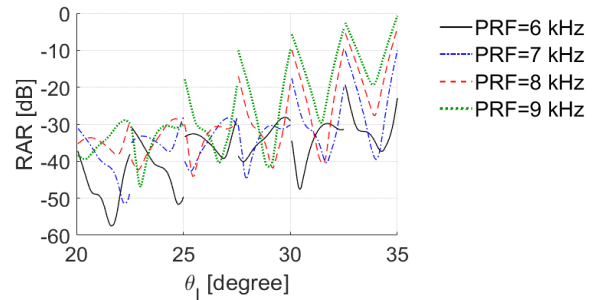
고도 505 km에서 운용되며, 150 km의 관측 폭을 가지는 단일편파 ScanSAR 시스템을 구성하였다^[9]. C 대역 주 파수를 사용하는 길이 3 m급 오프셋 반사판 안테나의 패턴은 FEKO 시뮬레이션 툴의 물리 광학(physical optics) 해석 방법을 통해 획득하여 사용하였으며, 입사각 $20^\circ \sim 35^\circ$ 영역에서 6개의 부관측폭을 가져감에 따라 급전 안테나는 6개의 선형 배열로 설정하였다. 부관측폭 및 관측 영역 설정 시 PRF와 펄스 폭 τ 의 곱인 Duty cycle, $DC = PRF \times \tau$ 은 0.1로 일정하게 설정하였다. 식 (1) 및 식 (2)에 따르면 모호성 비에는 안테나 패턴, 경사 거리, 입사각

등이 영향을 미친다. 본 절에서는 시스템 변수인 PRF와 PB의 변화에 따른 모호성 비의 변화를 살펴보고자 한다.

PRF는 SAR 시스템의 성능을 결정하는 중요한 변수이며, 식 (1) 및 식 (2)에서는 모호성 비 발생 각도 θ_A , θ_{AZ} 와 거리 ρ 와 연관이 있다. 본 절에서는 PRF를 전체 관측 폭에 대해 동일하다 가정을 하여 분석을 하였고, PRF의 변화에 따른 모호성 비의 변화는 그림 1에 도시하였다.

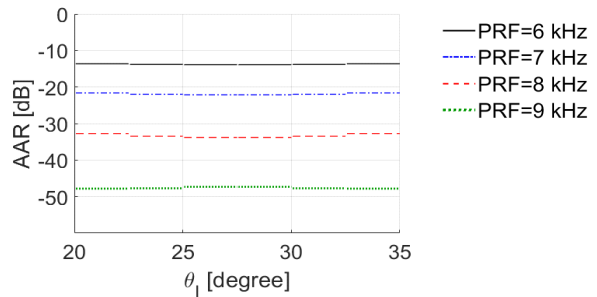
그림 1로부터 전체적으로 PRF의 증가에 따라 RAR 성능은 개선되고 AAR 성능은 저하된다는 것을 알 수 있다. 반면에 PRF의 감소는 RAR 성능을 개선시키고, AAR 성능을 저하시킨다. 즉, PRF의 변화에 따라 RAR과 AAR은 반대 경향으로 변화한다. 또한 입사각이 증가함에 따라서 RAR 성능이 안 좋아지는 경향이 있다. 이는 입사각이 클수록 위성으로부터 지표 거리가 멀어지며, 거리가 멀수록 θ_A 의 간격이 좁아지기 때문이다.

PB는 방위방향으로 신호가 들어오는 각도이며, 방위방



(a) PRF 변화에 따른 RAR의 변화

(a) Variation of RAR according to PRF Variation



(b) PRF 변화에 따른 AAR의 변화

(b) Variation of AAR according to PRF variation

그림 1. PRF 변화에 따른 모호성 성능

Fig. 1. Ambiguity performances according to PRF variation.

향 신호의 대역폭과 연관이 있다. PB는 일반적으로 3 dB 안테나 빔폭을 기준으로 삼는다. 그러나 필터링을 통해 PB를 조절하는 경우가 있다^[15]. 식 (1)~(4)에 따르면 PB의 변화는 방위방향에 대한 SAR 시스템 성능에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그러나 본 논문과 같이 반사판 안테나를 사용하는 경우, 거리방향의 모호성 비에서도 PB를 고려하는 것이 정확한 성능 분석을 가능하게 한다^[8]. 따라서 다음과 같이 식 (1)을 변형한 식 (7)을 사용하여 PB 변화에 따른 모호성 비 변화를 살펴보았다. 이때 각 부관측폭의 PRF는 앞서 분석한 그림 1의 결과로부터 6~7 kHz 범위에서 선정하였다.

$$\text{RAR} = \frac{\sum_{n \neq 0} \int_{PB} \frac{G_t(\theta_A(n), \theta_{AZ}) G_r(\theta_A(n), \theta_{AZ})}{\rho_{RA}^3(n) \sin(\theta_I(n))} d\theta_{AZ}}{\int_{PB} \frac{G_t(\theta_A(0), \theta_{AZ}) G_r(\theta_A(0), \theta_{AZ})}{\rho^3 \sin(\theta_I)} d\theta_{AZ}} \quad (7)$$

PB의 변화에 따른 모호성 비의 변화는 그림 3과 같다. 두 모호성 비가 PB의 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 띄며, 그 경향은 AAR에서 크게 나타난다. 이는 PB의 변화에 따라서 방위방향 모호성 신호가 발생하는 각도 근방에서의 방위방향 패턴 변화가 크기 때문이다. 반면에 거리방향 모호성 신호가 발생하는 각도에서의 방위방향 패턴 변화는 그림 2(b)에서 보이듯 크지 않기 때문에 RAR은 PB의 영향을 크게 받지 않는다. 따라서 PB의 영향은 AAR에서

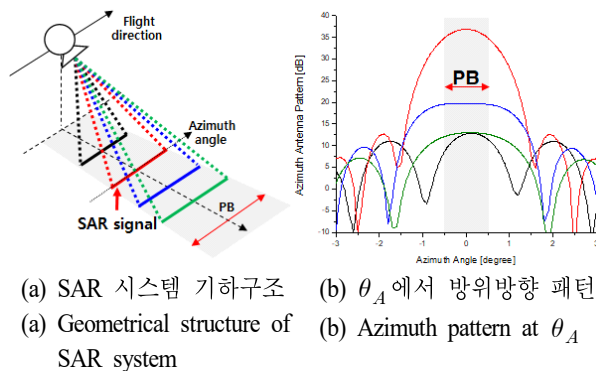
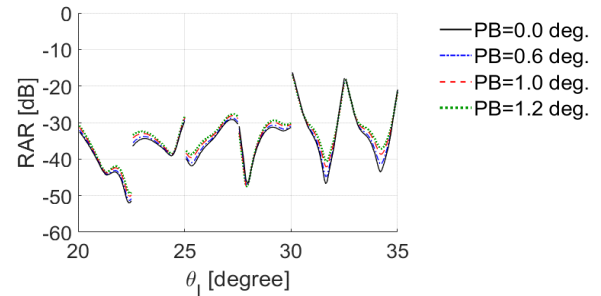
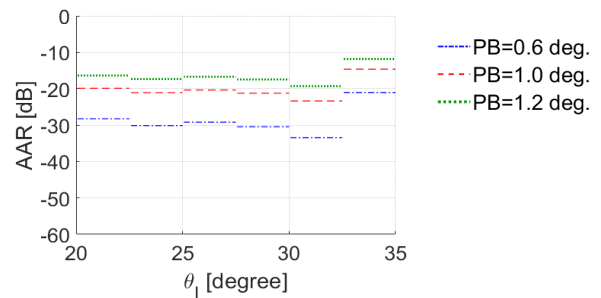


그림 2. RAR에 대한 PB 영향
 Fig. 2. Effect of PB for RAR.



(a) PB 변화에 따른 RAR의 변화
 (a) Variation of RAR according to PRF variation



(b) PB 변화에 따른 AAR의 변화
 (b) Variation of AAR according to PRF variation

그림 3. PB 변화에 따른 모호성 성능
 Fig. 3. Ambiguity performances according to PB variation.

중점적으로 고려한다. PB가 감소할수록 AAR 성능은 개선이 되지만 방위방향 해상도는 악화되므로, 실제 PB 선정 시에는 해상도가 고려된 하한선이 존재하여야 할 것이다.

앞서 살펴본 시스템 변수와 성능 사이의 관계를 바탕으로 단일편파 ScanSAR 시스템의 적절한 PRF, PB를 선정할 수 있다. -15 dB 이하의 모호성 비를 목표로 하였을 때 PRF는 6~7 kHz까지의 범위가 해당할 것이며, PB는 1° 근방의 값을 선택할 수 있다. 최종적으로 그림 8의 결과를 얻을 수 있으며, 이를 바탕으로 이후 분석할 Quad-pol ScanSAR 시스템의 성능과 비교를 수행할 것이다.

2-3 C 대역 SweepSAR 시스템

SweepSAR는 관측 시간의 감소없이 전체 관측 폭을 한번에 관측하기 때문에 고해상도 광역관측이 가능하지만 PRF를 낮춰 블라인드 거리를 피하고 AAR 성능을 보장하기 위해서 안테나 길이의 증가가 필요하다. 안테나의 길

이는 SAR 시스템의 방위방향 해상도와 관련이 있으며, 나이퀴스트 조건을 바탕으로 시스템의 PRF의 최소값이 제시되므로 관측 폭과 관련도 가진다^[13]. 본 절에서는 안테나 길이와 관측 폭, 해상도 사이의 관계를 개략적으로 알아보려고 한다. 안테나 길이는 3 m부터 15 m까지 1.5 m씩 증가를 시켜가며 살펴보았다. 나이퀴스트 조건을 바탕으로 PRF 범위를 선정하고, 입사각은 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 로 최대 영역으로 설정을 한 뒤 관측 폭을 조사하였으며, 해상도는 $L/2$ 로 계산하였다. 그 결과는 그림 4와 같다.

해상도와 관측 폭은 안테나 길이의 증가에 따라 모두 증가를 하며, 관측 폭은 안테나 길이가 9 m일 때부터 150 km를 확보할 수 있다. SweepSAR의 관측 폭을 앞서 살펴본 ScanSAR와 동일하게 가정한다면 9 m 이상의 안테나를 사용해야 할 것이며, 방위방향 모호성 비를 고려하여 13.5 m를 안테나 길이로 선정하였다. 13.5 m급 C 대역 오프셋 반사판 안테나의 패턴은 ScanSAR와 마찬가지로 FEKO 시뮬레이션 툴을 통해 획득하였다. 급전 안테나는 전체 26개를 사용한다. 송신 시에는 모든 급전 안테나를 사용하며, 넓은 빔폭으로 송신하며, 수신 시에는 양쪽 끝 1개씩을 제외한 24개의 급전 안테나를 순차적으로 동작시켜 좁은 빔폭으로 수신한다. 본 논문에서는 SweepSAR 시스템을 분석할 때 방위방향 송신 패턴은 안테나 조준각 방향(Bore-

표 1. 운용 모드별 성능 비교(단일편파)

Table 1. Performance comparison between each operation mode(Single-pol).

Operation mode	ScanSAR	SweepSAR
Swath width	150 km	
Reflector antenna	Antenna length: 3 m Feed array: 1×6	Antenna length: 13.5 m Feed array: 1×26
Number of the used feed	6	Tx: 26 Rx: 24
RAR	< -15 dB	< -90 dB
AAR	< -15 dB	< -20 dB
Resolution	8.4 m	5.4 m

sight angle)에서 얻었으며, 이 패턴이 모든 고각방향에 대해 균일하다고 가정하였다. PRF, PB에 대한 영향은 ScanSAR에서의 변화와 동일한 경향을 보이며, PRF는 1,710 Hz, PB는 안테나 빔폭에 맞춰 설정을 함으로써 그림 9의 결과를 얻을 수 있다^[9].

앞서 분석한 단일편파에 대한 ScanSAR와 SweepSAR 시스템의 분석결과는 표 1에 나타내었다.

III. Quad-pol SAR 시스템 성능 분석

3-1 Quad-pol SAR 시스템 요구조건

Quad-pol SAR 시스템은 그림 5와 같은 시스템 구성을 이루고, 수평 편파(H)와 수직 편파(V)를 각각 송·수신함으로써 HH, HV, VH, VV의 네 가지 정보를 얻을 수 있다. 이를 위해서는 H와 V가 번갈아 송신이 되어야 하며, 두 채널 전체에 대한 송신 PRF는 단일편파에 비해 약 2배 증가된 나이퀴스트 조건을 만족해야 한다^[7].

Quad-pol SAR 시스템은 그림 6과 같은 송·수신 펄스 타이밍 다이어그램을 가진다. Quad-pol 시스템에서는 그림 6에서 나타낸 바와 같이 수신 채널이 같은 서로 다른 편파의 신호가 동시에 수신되면서 섞일 수 있다. 따라서 거리방향의 모호성 신호로서 송신 채널이 다르고, 수신 채널이 같은 두 가지 신호가 고려되며, 송·수신 편파에 따른 후방산란계수(backscattering coefficient)의 차이 때문에 각 편파의 신호에 대한 후방산란계수 값을 고려한다^[8].

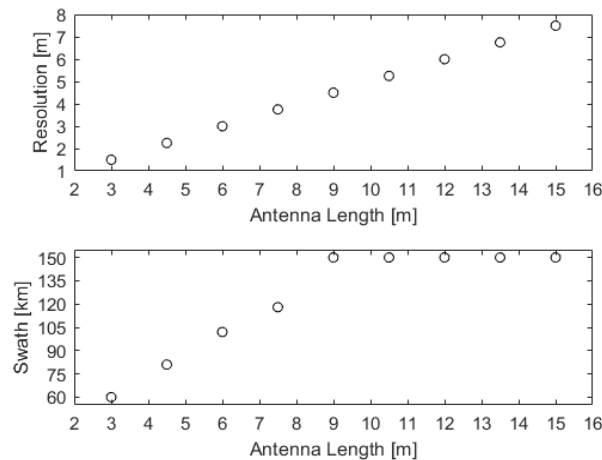


그림 4. SweepSAR 안테나 길이에 따른 관측 폭과 해상도의 변화

Fig. 4. Variation of swath-width and resolution according to antenna length of SweepSAR.

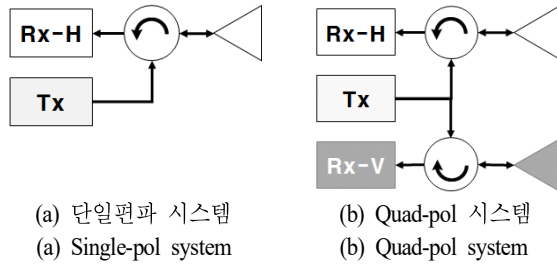


그림 5. SAR 송·수신 시스템 블록도

Fig. 5. Block diagram of SAR Tx/Rx system.

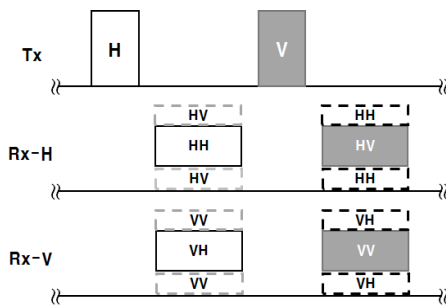


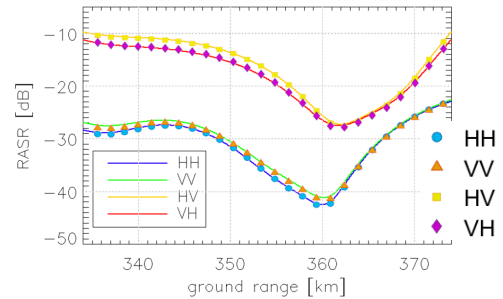
그림 6. Quad-pol SAR 시스템의 송·수신 펄스 타이밍 다이어그램

Fig. 6. Tx/Rx pulse timing diagram of quad-pol SAR system.

3-2 Quad-pol SAR 시스템 성능 분석

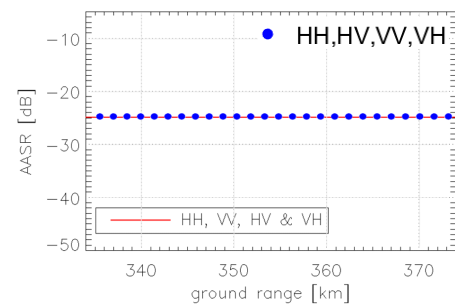
본 절에서는 앞서 분석한 단일편파 광역관측 SAR 시스템을 바탕으로 Quad-pol SAR 시스템의 성능을 분석하였다. 본 논문에서 다루는 SAR 시스템을 분석하기 전 참고문헌[8]에 제시되어 있는 L 대역 Stripmap mode quad-pol SAR 시스템의 변수들을 바탕으로 모호성 비 계산을 수행하고 결과를 비교함으로써 시스템 분석 과정에 대한 검증은 먼저 수행하고자 한다. 이때 사용되는 안테나는 평면형 안테나이며, 계산 과정에서는 Sinc 함수로 모델링된 패턴을 사용하였다^[13]. 계산 결과는 그림 7에 제시되어 있으며, 참고문헌의 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

결과 비교를 통해 검증된 분석 방법을 바탕으로 광역관측 운용 모드에 대한 Quad-pol SAR 시스템의 모호성 비 분석을 수행하고자 한다. 편파 및 주파수에 따른 후방산란계수는 참고문헌[8]이 사용하고 있는 모델을 사용하였다^[16]. 3-2-1절과 3-2-2절에서는 2장에서 살펴본 단일편



(a) 거리방향 모호성 비 비교 결과

(a) Comparison result of RAR



(b) 방위방향 모호성 비 비교 결과

(b) Comparison result of AAR

그림 7. Quad-pol SAR 시스템 성능 분석의 검증. Line: 참고문헌 [8], Symbol: 계산

Fig. 7. Verification of quad-pol SAR system performance analysis. Line: reference [8], Symbol: calculation.

파 SAR 시스템 변수를 바탕으로 Quad-pol SAR 시스템의 성능 변화를 분석한다. 앞선 검증 결과에 따르면 동일편파에 대한 RAR인 RAR_{HH} 와 RAR_{VV} 가 서로 유사하며, 교차편파에 대한 RAR인 RAR_{HV} 와 RAR_{VH} 가 서로 유사하므로 이후 분석에서는 RAR_{HH} 와 RAR_{HV} 만 제시하고자 한다.

3-2-1 Quad-pol ScanSAR 시스템 성능 분석

단일편파 SAR 시스템에서 Quad-pol SAR 시스템으로 바뀌면서 PRF가 증가하며, 이로 인해 관측 폭을 기존과 같이 그대로 유지하는 것이 어려워진다. 기존의 단일편파에서 6개의 부관측폭을 통해 150 km 관측 폭을 달성했었다면 Quad-pol SAR에서는 나이키스트 조건에 의한 PRF 최소값 근방에서 4개의 부관측폭을 통해 85 km 정도의

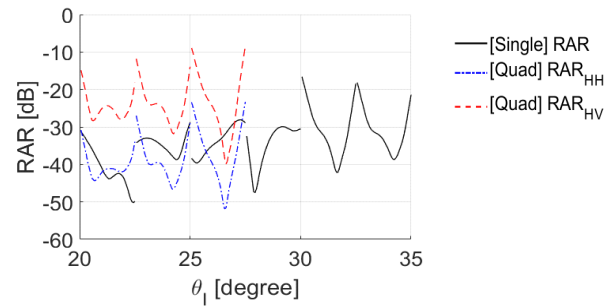
연속적인 관측 폭 밖에 가질 수 없다. 또한 PRF가 높아지고, 교차편파에 대한 후방산란계수가 동일편파에 대한 것보다 상대적으로 작기 때문에 교차편파에 대한 RAR 성능이 매우 악화된다. 반면에 동일편파에 대한 RAR은 상대적으로 크기가 작은 교차편파에 대한 낮은 후방산란계수의 영향이 조준각 근처에서 모호성 신호로서 반영이 되기 때문에 큰 악화는 없다.

시스템 변수 선정을 통해 RAR 성능을 개선하기 위해서는 PRF를 낮출 필요가 있지만, 이로 인해서 AAR 성능이 저하된다. PRF 감소 이후 AAR의 개선은 PB의 조절을 통해 수행한다. RAR과 AAR은 -10 dB를 목표 수준으로 설정을 하였고, 이에 맞는 시스템 변수를 선정하였다. 입사각이 큰 지역에서는 시스템 변수 조절만으로는 목표 요구 조건을 만족시킬 수 없으므로 제외를 하게 되고, 최종적으로는 3개의 부관측폭을 통해 70 km의 관측 폭을 가지며, PRF는 입사각이 작은 영역의 부관측폭부터 각각 11 kHz, 10 kHz, 9.25 kHz를 선정하였으며, PB는 0.6° 를 선정하였다. ScanSAR에서 부관측폭이 절반 가까이 줄었지만 모호성 비 성능을 위하여 PB가 줄면서 해상도는 약 8.4 m에서 7.1 m로 소폭 감소하였다. Quad-pol ScanSAR 시스템에 대한 모호성 성능 분석 결과는 그림 8에 앞서 분석한 단일편파의 결과와 같이 도시하였다.

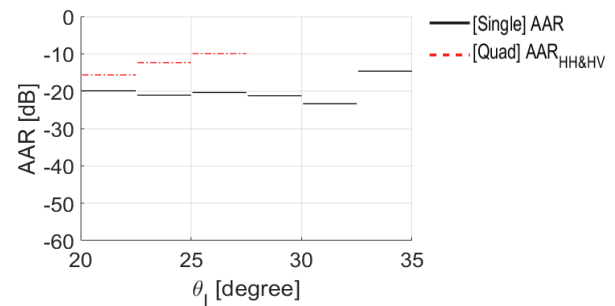
3-2-2 Quad-pol SweepSAR 시스템 성능 분석

앞서 ScanSAR 시스템에서 수행한 과정과 마찬가지로 SweepSAR 모드의 Quad-pol SAR 활용에 대한 시스템 성능을 분석하였다. ScanSAR에서의 경우와 마찬가지로 PRF가 증가함으로써 블라인드 거리 사이의 폭이 좁아지므로 SAR 시스템의 관측 폭이 줄어든다. 그러나 ScanSAR의 경우와는 다르게 관측 폭이 변화하여도 동일한 안테나를 사용하고 있으므로 관측 폭의 변화는 해상도와 직접 연관이 있지 않다.

교차편파에 대한 RAR의 성능이 매우 악화되었으나, 기존의 단일편파 시스템에서의 RAR 값이 매우 작았으므로 -20 dB로 설정한 Quad-pol SweepSAR에서의 모호성 비 목표 수준을 맞추는 것에 문제가 되지 않는다. 최종적으로 관측 폭 75 km, PRF는 $3,400$ Hz를 선정하였으며, PB는 안테나 빔폭인 0.26° 를 사용한다. SweepSAR 시스템에서



(a) ScanSAR 시스템의 RAR
(a) RAR of ScanSAR system



(b) ScanSAR 시스템의 AAR
(b) AAR of ScanSAR system

그림 8. ScanSAR 시스템의 단일편파 및 Quad-pol 성능
Fig. 8. Single-pol and quad-pol performances of ScanSAR system.

해상도는 약 5.4 m이다. Quad-pol SweepSAR 시스템에 대한 모호성 비 분석 결과는 그림 9와 같다.

3-3 광역관측 Quad-pol SAR 시스템 성능 비교

본 절에서는 앞서 살펴본 Quad-pol ScanSAR 및 SweepSAR 시스템의 성능 분석 결과를 바탕으로 비교를 수행한다. ScanSAR의 경우, 단일편파 시스템에 비해 Quad-pol 시스템의 성능이 낮으며, 특히 교차편파에 대한 RAR 성능이 문제가 된다. Quad-pol에서는 PRF의 증가로 인해 블라인드 거리 간 간격이 좁아지기 때문에 단일편파만큼 넓은 관측 폭을 확보하는 것에 어려움이 있다. 또한 입사각이 큰 지역에서 모호성 비 성능의 악화가 심하므로 충분한 성능을 가질 수 있는 관측 폭의 확보에 더욱 어려움을 겪는다. 이에 따라 모호성 비 기준 충족을 위해서 관측 폭이 감소하며, 부관측폭 수와 함께 PB를 감소시켜서 해상도

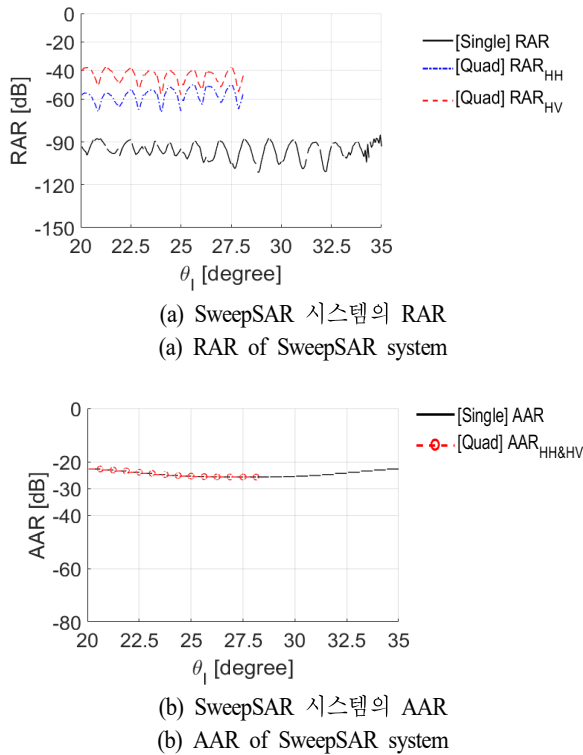


그림 9. SweepSAR 시스템의 단일편파 및 Quad-pol 성능
Fig. 9. Single-pol and quad-pol performances of SweepSAR system.

측면에서는 약간의 성능 향상이 있었다.

SweepSAR의 경우도 마찬가지로 교차편파에 대한 거리 방향 모호성 비 성능이 악화되지만 기존의 단일편파에서 RAR 성능이 우수하므로 목표 모호성 비 수준을 만족시키는 것에는 무리가 없다. 관측 폭은 ScanSAR와 마찬가지로 약 절반 정도의 감소를 가지며, 동일한 안테나를 사용하고 PB의 변화는 주지 않았기 때문에 해상도는 유지된다.

Quad-pol 시스템에서 두 광역관측 SAR 운용모드의 성능 비교는 단일편파에서의 경우와 마찬가지로 SweepSAR가 모호성 비, 해상도 측면에서 모두 ScanSAR에 비해 우수하지만 ScanSAR보다 큰 안테나를 필요로 한다. 모호성 비 분석 결과는 그림 10과 같다.

결론적으로, 단일편파 SAR 시스템의 성능에 비하여 Quad-pol SAR 시스템은 관측 폭이 절반 가까이 감소하며, 모호성 비가 악화된다. 또한 ScanSAR보다 SweepSAR가 단일편파 및 Quad-pol SAR 시스템에서 모호성 비 성능이

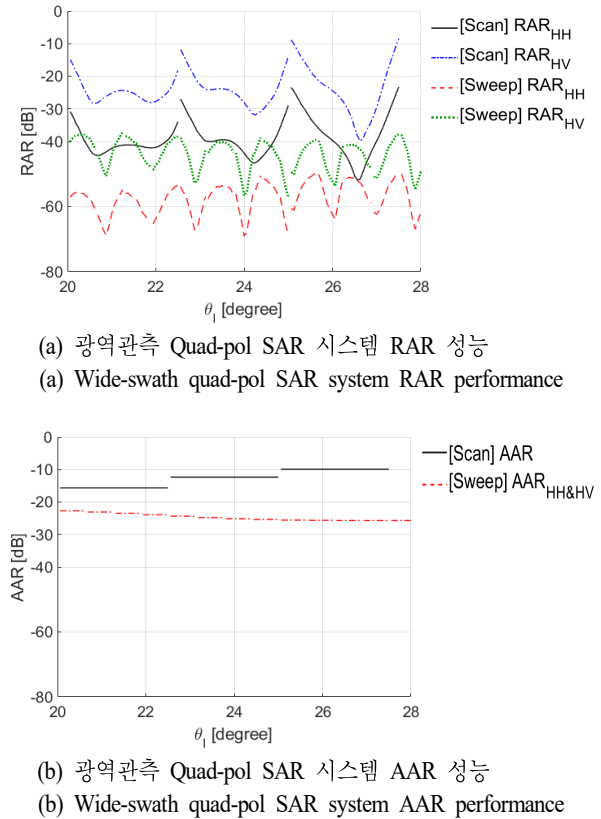


그림 10. Quad-pol ScanSAR 및 SweepSAR 모호성 비 성능
Fig. 10. Ambiguity performances of quad-pol ScanSAR and SweepSAR.

우수하지만 보다 큰 안테나를 필요로 하게 된다. 해상도 측면에서도 SweepSAR는 큰 안테나를 사용하지만 전체 관측 폭을 지속적으로 관측하기 때문에 ScanSAR에 비해서 성능이 좋다는 것을 알 수 있다. 본 절에서 살펴본 관계들을 단일편파에서의 분석 내용과 함께 표 2에 나타내어 비교하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광역관측 Quad-pol SAR 시스템의 성능을 분석하였으며, 각 운용 모드 별로 단일편파와 Quad-pol SAR 시스템의 특징을 알아보고 비교하였다. ScanSAR 모드는 여러 부관측폭을 겹으로써 넓은 영역을 관측할 수 있으나 방위방향 해상도가 악화된다. 반면에 SweepSAR 모드는 고해상도 광역관측이 가능하지만 안테나 크기가

표 2. 각 운용 모드 별 단일편파 및 Quad-pol SAR 시스템 성능

Table 2. Single-pol and quad-pol SAR system performance of each operation mode.

Polarization	ScanSAR		SweepSAR	
	Single	Quad	Single	Quad
Reflector antenna	Antenna length: 3 m Feed array: 1×6		Antenna length: 13.5m Feed array: 1×26	
Number of the used feed	6	3	Tx: 26 Rx: 24	Tx: 26 Rx: 13
Swath width	150 km	70 km	150 km	75 km
RAR	< -15 dB	< -10 dB	< -90 dB	< -40 dB
AAR	< -15 dB	< -10 dB	< -20 dB	< -20 dB
Resolution	8.4 m	7.1 m	5.4 m	5.4 m

증가할 필요가 있다. 또한 Quad-pol SAR 시스템은 다양한 지표의 정보를 얻을 수 있지만 SAR 시스템의 성능 변수들에 많은 영향을 준다.

SAR 시스템의 관측 폭, 모호성 비, 해상도는 PRF, PB 등과 상관관계가 있으며, 본 논문에서 살펴본 관계를 바탕으로 주어진 SAR 시스템 운용 상황 및 안테나 패턴을 적용하여 광역관측 SAR 운용 모드의 Quad-pol SAR 시스템의 성능을 분석하고, 목표 요구 조건을 충족시키기 위한 적절한 SAR 시스템 변수를 선정할 수 있다. 또한 각 운용모드의 특징으로부터 적합한 SAR 운용 모드 및 반사판 안테나를 설계할 수 있을 것이다.

그러나 SAR 시스템의 성능과 시스템 변수 사이의 복잡한 관계로 인해 관측 폭, 해상도, 모호성 비와 같은 성능을 모두 좋은 방향으로 변화시키는 것은 어려우므로 시스템 변수 선정만으로는 성능 개선에 한계가 있을 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 안테나 크기의 변화를 고려해야 할 것이다.

References

[1] A. Currie, M. A. Brown, "Wide-swath SAR," in *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, vol. 139, no. 2, pp. 122-135, Apr. 1992.

[2] D. D'Aria, F. D. Zan, D. Giudici, A. M. Guarnieri, and

F. Rocca, "Burst-mode SARs for wide-swath surveys," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 33, no. 1, pp. 27-38, Feb. 2007.

[3] 김세영, 성진봉, 이동우, 심상훈, "광역관측을 위한 영상레이더 TOPS 모드 설계 기법," *한국항공우주학회지*, 43(5), pp. 466-471, 2015년 5월.

[4] A. Freeman, G. Krieger, P. Rosen, M. Younis, W. T. K. Johnson, and S. Huber, et al., "SweepSAR: Beam-forming on receive using a reflector-phased array feed combination for spaceborne SAR," in *2009 IEEE Radar Conference*, Pasadena, May 2009.

[5] V. Turkar, R. Deo, S. Hariharan, and Y. S. Rao, "Comparison of classification accuracy between fully polarimetric and dual-polarization SAR images," in *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vancouver, BC, Jul. 2011, pp. 440-443.

[6] Y. Yamaguchi, S. Sengoku, H. Yamada, and R. Sato, "Scattering power decomposition result of ALOS2 quad pol data along amazon river," in *EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, Germany, Jun. 2018, pp. 1-4.

[7] R. K. Raney, A. Freeman, and R. L. Jordan, "Improved range ambiguity performance in quad-pol SAR," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 2, pp. 349-356, Feb. 2012.

[8] M. Villano, G. Krieger, and A. Moreira, "New insight into ambiguities on quad-pol SAR," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 6, pp. 3287-3308, Jun. 2017.

[9] S. S. Yoon, J. W. Lee, T. K. Lee, S. B. Ryu, H. C. Lee, and S. G. Lee, "A modified SweepSAR mode with dual channels for high resolution and wide swath," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 3, pp. 199-205, Jul. 2018.

[10] S. Y. Kim, N. H. Myung, and M. J. Kang, "Antenna mask design for SAR performance optimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 443-447, Jul. 2009.

- [11] M. S. Kang, Y. J. Won, B. G. Lim, and K. T. Kim, "Efficient synthesis of antenna pattern using improved PSO for spaceborne SAR performance and imaging in presence of element failure," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 16, pp. 6576-6587, Aug. 2018.
- [12] 강민석, 원영진, 임병균, 김경태, "안테나 소자 결함을 고려한 안테나 빔 패턴 재합성을 통한 위성 SAR 성능향상에 대한 연구," *한국전자과학회논문지*, 29(8), pp. 624-631, 2018년 8월.
- [13] W. A. Imbriale, *Spaceborne Antennas for Planetary Exploration*, New York, NY: John Wiley & Sons, pp.

305-317, 2006.

- [14] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Boston, MA, Artech House, pp. 113-157, 2005.
- [15] H. M. Braun, "A new SAR sensor designed for micro-satellites," in *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, HI, Jul. 2010, pp. 213-215.
- [16] F. T. Ulaby, M. C. Dobson, *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*, Norwood, MA, Artech House, 1989.

임 정 환 [한국항공대학교/석사과정]



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
 2018년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정
 [주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템, EMI/EMC

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1998년 3월 ~2004년 2월: 한국전자통신

연구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹
 2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능, 수동 소자 해석 및 설계, EMI/EMC 대책 기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테나 설계, 위성 통신 안테나, 전자장 수치 해석

윤 성 식 [한화시스템/전문연구원]



2010년 8월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2013년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
 2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)
 2018년 3월~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템

이 택 경 [한국항공대학교/교수]



1983년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1990년 5월~1991년 4월: University of

Texas at Austin, Post-Doctoral Fellow

1991년 9월~1992년 2월: 한국과학기술원 정보전자연구소 연구원
 2001년 7월~2002년 7월: University of Illinois at Urbana-Champaign, 방문 교수
 2014년: 한국전자과학회 회장
 1992년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파, 안테나, 전자파해석, 레이더

유 상 범 [한국항공우주연구원/선임연구원]



1996년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2010년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학박사)
 2011년~현재: 한국항공우주연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 지구관측위성, 마이크로파원격탐사, 위성통신시스템, 원격측정 명령계

이 상 규 [한국항공우주연구원/책임연구원]



1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 2011년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1995년~현재: 한국항공우주연구원 위성

연구본부 탑재체전자팀 팀장, 책임연구원

[주 관심분야] 영상코딩, 안테나 및 전자파전파, EESS 통신시스템, 위성통신

이 현 철 [한국항공우주연구원/책임연구원]



1989년~1997년: 국방과학연구소, 정찰용 무인기개발실
 1997년~2001년: Texas A&M University 전기전자공학과 (공학박사)
 2002년~2003년: Texas A&M University 전산학과 Post-Doctorate
 2003년~현재: 한국항공우주연구원 책임

연구원

[주 관심분야] 영상레이다 신호처리, 위성통신