

KOMPSAT-5 영상에 대한 재초점화(Refocusing) 성능 분석

Performance Analysis of Refocusing Algorithms for KOMPSAT-5 Images

이 승 재 · 이 선 구

Seung-Jae Lee · Sun-Gu Lee

요 약

본 논문에서는 표적의 속도나 불규칙한 움직임으로 인해 발생하는 SAR 표적 신호의 블러링(blurring) 현상을 보정하는 재초점화 기법의 성능 분석 연구를 수행한다. 이를 위해, 다목적실용위성 5호(Korea Multi-Purpose SATellite-5: KOMPSAT-5) 영상에서 블러링이 발생한 표적 신호를 포함하는 부영상을 추출하여 신호처리를 수행한 후, 재초점화(refocusing) 기법을 적용하여 블러링 현상 보정에 대한 성능을 분석한다.

Abstract

In this study, we analyzed the performance of a refocusing algorithm that compensates for the blurring effect of a moving target in a synthetic aperture radar image. First, sub-images containing blurred target signals were extracted from the images obtained from the KOREA Multi-Purpose SATellite-5 (KOMPSAT-5). Subsequently, some refocusing algorithms were applied to the sub-images to compensate for the blurring effect of the moving target, and their performance was analyzed.

Key words: Moving Target, KOMPSAT-5, Refocusing, Remote Sensing, Satellite SAR

I. 서 론

위성 합성 개구 레이더(synthetic aperture radar: SAR)는 대부분의 기상 조건에서 관심 지역에 대한 영상 생성이 가능하다. 이러한 전천후 관측 특성으로 인하여, 위성 SAR 영상은 광학 영상에 비해 다양한 환경에서 표적 정보 분석에 활용될 수 있다. 하지만 위성 SAR 영상 형성 시, 표적이 갖는 속도나 불규칙한 움직임은 위성 영상 내 표적 신호의 블러링(blurring) 현상을 초래하고 품질을 저하시켜, 관심 표적에 대한 탐지 및 식별을 어렵게 한다.

기존 SAR 분야에서는 상기 표적 신호의 블러링 현상

을 보정하기 위해 역합성 개구 레이더(inverse synthetic aperture radar: ISAR) 개념을 도입하여 표적 신호에 대한 재초점화(refocusing)를 수행하는 연구들이 수행되어 왔으며^{[1]~[3]}, SAR 영상 내 표적 신호의 블러링을 효과적으로 제거할 수 있음을 보였다. 이는 표적의 움직임으로 인해 변형된 표적의 산란 메커니즘 정보를 정확히 복원하여 관측관들에게 표적 분석을 위한 핵심 정보를 제공 가능하다는 것을 의미한다.

재초점화는 ISAR 자동초점화(ISAR autofocus: IA) 기법^{[4]~[12]} 및 최적 시간 윈도우(optimal time windowing: OTW) 기법^{[11],[13]}을 이용하여 수행될 수 있다.

「본 연구는 한국항공우주연구원 위성정보활용 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.」

한국항공우주연구원 위성활용부(Satellite Application Division, Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received February 28, 2022 ; Revised March 16, 2022 ; Accepted March 21, 2022. (ID No. 20220228-003S)

· Corresponding Author: Seung-Jae Lee (e-mail: jelline15@kari.re.kr)

IA 기법은 표적의 움직임으로 인해 레이더 수신 신호에 발생하는 위상오차를 제거하는 과정이다. 현재까지 위상오차를 효과적으로 제거하는 많은 알고리즘들이 연구되어 왔다. 특히, ISAR 영상의 샤논 엔트로피(Shannon entropy)나 트살리스 엔트로피(Tsallis entropy)를 최소화하는 위상오차 추정 기법^{[4],[5]}, 고유영상(eigen image) 기반 IA 기법^[6], 표적의 회전 운동(rotational motion)과 병진 운동(translational motion)에 의한 위상오차를 순차적으로 제거하는 알고리즘^[7] 등이 연구되어 왔으며, 속도 및 정확도 측면에서 우수한 초점화 성능을 보였다. 더불어, 최근 압축 센싱(compressive sensing: CS) 기술을 활용한 다양한 IA 연구들이 수행되어 왔으며^{[8]~[12]}, CS 기술의 특성을 효율적으로 활용하여 수신 데이터가 일부 누락된 경우에도 고성능의 초점화를 수행할 수 있음을 보였다.

OTW 기법은 일관 처리 간격(coherent processing interval: CPI) 동안 수신한 전체 레이더 수신신호에서 영상 품질을 최대화 할 수 있는 수신신호만 선택하는 최적 시간 윈도우(time window)를 결정한다. 대표적으로 영상 대비(image contrast: IC)를 최대화할 수 있는 시간 윈도우를 선택하는 기법이 제안되었으며^[13], 상기 기법에서는 최적 시간 윈도우가 선택됨과 동시에 재초점화된 영상이 출력된다.

최근 초소형/군집 SAR 위성 개발이 세계적으로 다수 이루어지는 추세이며, SAR 원격탐사의 중요성이 급격히 커지고 있다. 하지만, 실제 위성 SAR 영상에 재초점화 기법을 적용하여 그 성능을 조사 및 분석한 연구는 부족한 상황이다. 이에 기존 재초점화 기법들을 실제 위성 SAR 영상에 적용하여 성능 검증을 수행하는 연구가 다수 필요하다 판단된다. 본 논문에서는 한국항공우주연구원 에서 운용 중인 다목적실용위성 5호(KOrea Multi-Purpose SATellite-5: KOMPSAT-5) 영상을 이용하여 블러링이 발생한 표적 신호에 재초점화 기법을 적용한 후, 그 성능을 분석한다.

II. KOMPSAT-5 영상 표적 신호의 재초점화

KOMPSAT-5 표적 영상의 블러링 현상을 보정하기 위해 먼저 블러링이 발생한 표적 신호만을 포함하는 부영상(sub-image)을 추출한다. 다음으로, ISAR 신호처리 기반 재초점화 기법들을 적용하기 위해 추출된 거리(range)-

아지무스(azimuth) 영역의 표적 부영상을 ISAR 원신호(raw data)와 유사한 형태로 변환한다. 이를 위해, M. Martorella^[2]는 역 $\Omega-k$ 알고리즘, 역칩 스케일링(chirp scaling) 알고리즘, 푸리에 역산(Fourier inversion) 등을 통해 변환을 수행하였으며, 변환 기법에 따른 재초점화 성능 차이는 크게 나타나지 않았다. 본 연구에서는 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform: FFT)에 기반한 푸리에 역산을 이용하여 표적 신호를 ISAR 원 신호와 유사하게 변환하였다. 이 때, 변환된 데이터의 크기는 부영상의 크기와 동일하다. 마지막으로 IA 기법과 OTW 기법을 활용하여 표적 신호의 재초점화를 수행하였다.

2-1 ISAR 자동초점화(ISAR Autofocus: IA)

앞서 기술한 바와 같이 현재까지 위상오차를 효과적으로 제거하는 다양한 알고리즘들이 연구되어 왔으며, 본 연구에서는 표적 신호의 샤논 엔트로피(Shannon entropy: SE) 최소화 기반 위상오차 제거 알고리즘^[4]을 활용하여 재초점화를 수행하였다. ISAR 기하구조에서 수신 신호에 포함된 위상오차를 제거하는 IA는 아래와 같이 나타낼 수 있다^[4].

$$g(k, n) = \sum_{m=0}^{M-1} f(m, n) \exp[j\phi(m)] \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right) \quad (1)$$

여기서 $f(m, n)$ 은 위상오차를 포함한 레인지 압축 신호(range-compressed signal), $\phi(m)$ 은 위상오차 보정 성분, $g(k, n)$ 은 위상오차가 제거된 복소 영상(complex image)을 나타낸다. SE 최소화 기반 IA는 먼저 $|g(k, n)|^2$ 의 SE를 최소화하는 $\phi(m)$ 을 추정한다. $|g(k, n)|^2$ 의 SE는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E[|g(k, n)|^2] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|g(k, n)|^2}{S} \ln \frac{S}{|g(k, n)|^2} \quad (2)$$

여기서 $S = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g(k, n)|^2$ 이다. 다음으로, 식 (2)를 최소화하는 $\phi(m)$ 을 추정하기 위해, 식 (1)을 $\phi(m)$ 에 대하여 미분하면 아래와 같다.

$$\frac{\partial E[|g(k, n)|^2]}{\partial \phi(m)} = 2M \times \text{Im}\{\exp[j\phi(m)] a^*(m)\} \quad (3)$$

$$a(m) = \sum_{n=0}^{N-1} f^*(m,n) \frac{1}{M} \times \sum_{k=0}^{M-1} [1 + \ln |g(k,n)|^2] g(k,n) \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right) \quad (4)$$

식 (4)의 $a(m)$ 을 이용하면 식 (3)을 최소화하는 $\phi(m)$ 을 계산할 수 있으며, 이를 특정 조건이 만족될 때까지 반복적으로 계산하여 최종 위상오차 보정 성분 $\hat{\phi}(m)$ 을 추정한다. 마지막으로 $\hat{\phi}(m)$ 을 식 (1)의 $\phi(m)$ 부분에 대입하여 재초점화된 영상을 형성한다.

2-2 최적 시간 윈도우(Optimal Time-Windowing: OTW)

실제 표적 관측 상황에서는 CPI 동안 표적의 움직임을 일관되게 모델링하기 어려운 경우가 빈번히 발생한다. 특히 해상에 존재하는 표적은 파도에 의해 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)와 같은 복잡한 자가 운동(self motion)을 하며, 이로 인하여 CPI 동안 유효 회전 벡터(effective rotation vector: ERV) 및 영상 투사 평면(image projection plane: IPP)이 일정하지 않게 되어 표적 신호는 블러링된다. OTW 기법은 전체 레이다 수신신호에서 영상 품질을 최대화할 수 있는 수신신호만 선택하는 최적 시간 윈도우(time window)를 결정한다. 본 논문에서는 영상의 품질 평가(quality evaluation) 지표로 IC를 이용하는 기법^[13]을 활용하였으며, 상기의 기법에서는 최적 시간 윈도우가 결정됨과 동시에 재초점화된 영상이 출력된다. 먼저, 특정 시간 윈도우 내의 수신신호로 형성된 표적 부영상의 IC는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$C(I[m,n]) = \frac{\sigma(|I[m,n]|^2)}{E(|I[m,n]|^2)} \quad (5)$$

여기서, $I[m,n]$ 은 표적부 영상, $\sigma(|I[m,n]|^2)$ 은 $|I[m,n]|^2$ 의 표준편차, $E(|I[m,n]|^2)$ 은 $|I[m,n]|^2$ 의 평균이다.

먼저, 시간 윈도우의 중심 t_{cen} 과 크기 Δt 를 선형적으로 변경해가며 선택된 수신신호만 이용하여 반복적으로 표적 부영상을 형성한다. 다음으로, 식 (6)과 같이 표적 부영상의 IC가 최대가 되게 하는 t_{cen} 과 Δt 를 이용하여 최적 시간 윈도우를 결정한다^[13].

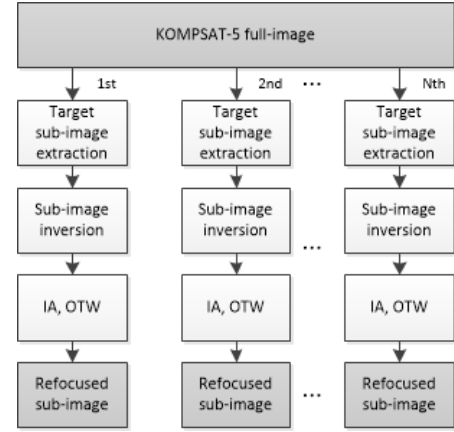


그림 1. KOMPSAT-5 영상에 대한 재초점화의 흐름도
Fig. 1. Flowchart of refocusing for KOMPSAT-5 image.

$$(t_{cen}, \Delta t) = \arg \max_{t_{cen}, \Delta t} [IC(t_{cen}, \Delta t)] \quad (6)$$

최종적으로, t_{cen} , Δt 를 이용하여 형성되었던 표적 부영상을 재초점화된 영상으로 출력한다.

그림 1은 본 과제에서 수행한 KOMPSAT-5 영상에 대한 재초점화의 흐름도(flowchart)를 나타낸다.

III. 실험 결과

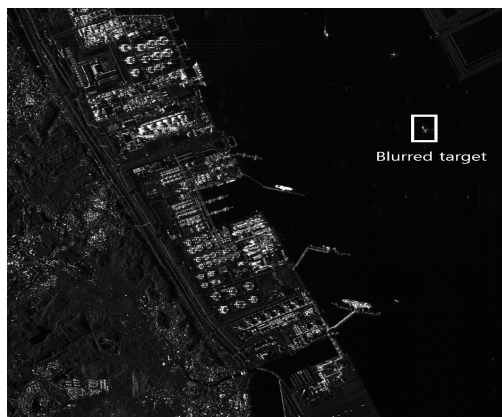
본 논문에서는 현재 한국항공우주연구원에서 실제 운용 중인 KOMPSAT-5 영상을 확보하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 KOMPSAT-5 영상은 그림 2와 같고, 이와 관련된 상세 정보는 표 1에 나타나 있다.

먼저 그림 2의 KOMPSAT-5 영상들에서 표적의 움직임으로 인해 블러링이 발생한 신호를 탐색하였으며, 2개의 선박 신호에서 명확한 블러링 현상을 관측할 수 있었다. 다음으로, 전체 KOMPSAT-5 영상으로부터 블러링 현상을 보이는 2개의 선박을 각각 포함하는 부영상을 추출하였다. 마지막으로, 각 부영상에 푸리에 역산과 IA 및 OTW 기법을 적용하여 재초점화를 수행하였다.

그림 3과 그림 4는 블러링이 발생한 선박 신호에 대해 IA 및 OTW 기법을 적용한 결과를 보여준다. 그림 3과 그림 4에서 IA 및 OTW 기법 모두 재초점화를 성공적으로 수행하며 선박 부 영상의 블러링 현상을 크게 완화시킬 수 있다. 특히, IA 기법을 적용한 결과에서 선



(a) K5 영상 (2017. 01. 29.)
(a) K5 image (2017. 01. 29.)



(a) K5 영상 (2019. 09. 01.)
(a) K5 image (2019. 09. 01.)

그림 2. 실험에 사용된 KOMPSAT-5 영상들
Fig. 2. KOMPSAT-5 images used in experiment.

표 1. 실험에 사용된 KOMPSAT-5 영상들의 상세 정보
Table 1. Detail information of KOMPSAT-5 images used in experiment.

Satellite	KOMPSAT-5	
Acquisition time	2017. 01. 29	2019. 09. 01
Observation mode	Spotlight (EH)	Spotlight (UH)
Polarization	HH	HH
Slant-range resolution	0.62 [m]	0.63 [m]
Azimuth resolution	0.79 [m]	0.54 [m]
Slant-range pixel spacing	0.49 [m]	0.51 [m]
Azimuth pixel spacing	0.61 [m]	0.56 [m]

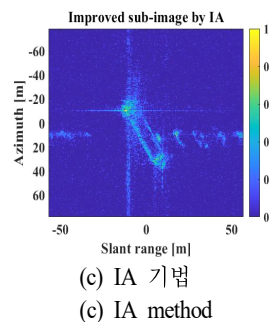
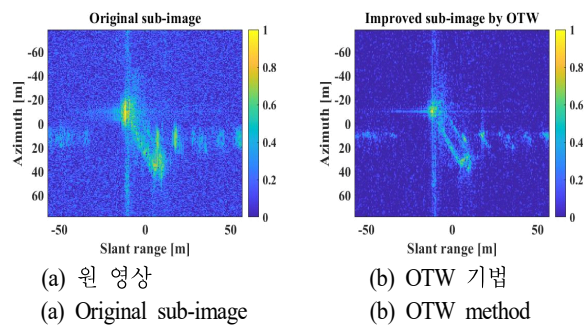


그림 3. 선박 표적 1에 대한 재초점화 결과
Fig. 3. Refocusing results for ship target 1.

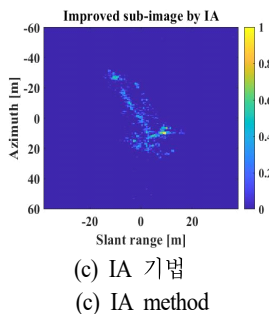
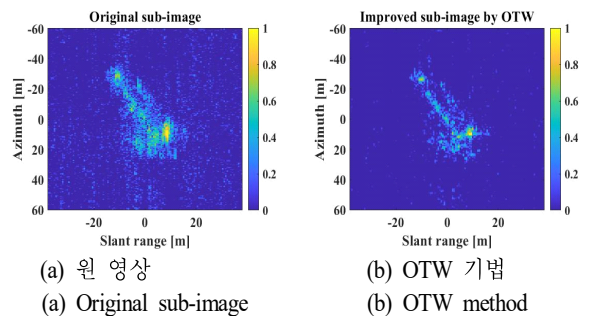


그림 4. 선박 표적 2에 대한 재초점화 결과
Fig. 4. Refocusing results for ship target 2.

박 신호의 부엽(sidelobe) 등 불필요한 부분이 대부분 제거되었으며 명확한 선박의 산란 메커니즘이 관측될 수 있었다. 두 기법의 원리상, IA 기법은 주로 선박의 병진 운동(translational motion)에 의한 블러링 현상을, OTW 기법은 주로 파도에 의한 선박의 자가 운동(self motion)으로부터 기인하는 블러링 현상을 저감시킨 것으로 사료된다.

재초점화 성능에 대한 정량적 분석을 수행하기 위해 각 표적 부영상의 SE 및 IC를 계산하여 비교 분석하였다.

SE 및 IC는 레이다 영상의 품질 평가(quality evaluation)에 주로 이용되며 재초점화를 수행한 표적 부 영상에 대해 식 (2)와 식 (5)를 이용하여 각각 계산되었다.

이 때, 잡음에 대한 재초점화의 성능 분석을 위해, 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)가 10 dB부터 40 dB 까지 10 dB 간격으로 변화하도록 부가 백색 가우시안 잡음을 재초점화 알고리즘의 입력데이터에 추가한 후, 실험을 수행하였다.

SNR에 따른 선박 부영상의 SE는 표 2와 표 3에 나타나 있으며, OTW 및 IA 기법이 SE를 줄이며 표적 부영상의 품질을 향상시키는 것을 확인할 수 있다.

또한, 표 4와 표 5는 SNR에 따른 선박 부영상의 IC를 보여준다. 표 4와 표 5에서 OTW 및 IA 기법 모두 선박 표적 부영상의 IC를 크게 향상시켰으며, 특히 IA 기법이

표 2. SNR에 따른 선박 표적 1 부영상의 샤논 엔트로피
Table 2. SE of ship target 1 sub-image versus SNR.

Algorithm	SNR [dB]			
	10	20	30	40
Original	6.9	6.9	6.9	6.9
OTW	6.35	6.04	6	5.99
IA	5.88	5.35	5.28	5.27

표 3. SNR에 따른 선박 표적 2 부영상의 샤논 엔트로피
Table 3. SE of ship target 2 sub-image versus SNR.

Algorithm	SNR [dB]			
	10	20	30	40
Original	7.94	7.94	7.94	7.94
OTW	7.82	7.61	7.59	7.58
IA	7.47	7.2	7.19	7.18

표 4. SNR에 따른 선박 표적 1 부영상의 영상 대비
Table 4. IC of ship target 1 sub-image versus SNR.

Algorithm	SNR [dB]			
	10	20	30	40
Original	20.2	20.2	20.2	20.2
OTW	41.39	43.94	44.16	44.24
IA	66.07	71.43	71.99	72.07

표 5. SNR에 따른 선박 표적 2 부영상의 영상 대비
Table 5. IC of ship target 2 sub-image versus SNR.

Algorithm	SNR [dB]			
	10	20	30	40
Original	8.18	8.18	8.18	8.18
OTW	11.55	12.5	12.61	12.62
IA	19.22	21.4	21.41	21.64

더욱 우수한 재초점화 성능을 보임을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 블러링이 발생한 실제 KOMPSAT-5 영상에 재초점화 기법을 적용한 후, 그 성능을 정성적, 정량적으로 분석하였다. 실험 결과에서 재초점화 기법은 선박 표적 신호에 존재하는 블러링을 효과적으로 완화하며, 표적 부영상의 품질을 크게 향상시켜 보다 정확한 표적 정보를 제공함을 확인할 수 있었다. 향후, 재초점화 기법을 활용하여 KOMPSAT-5 영상 기반 표적 탐지 및 식별에 대한 효과적인 방안을 계획할 수 있을 것으로 보인다. 특히, 최근 이슈인 인공지능 기반 선박탐지 등 대량의 훈련 데이터셋을 필요로 하는 분야에 고품질 데이터셋 구축을 위한 방안으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] V. C. Chen, M. Martorella, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms and Applications*, Edison, NJ, SciTech, 2014.
- [2] M. Martorella, E. Giusti, F. Berizzi, A. Bacci, and E. D. Mese, "ISAR based technique for refocusing non-

- cooperative targets in SAR images," *IET Radar Sonar and Navigation*, vol. 6, no. 5, pp. 332-340, Jun. 2012.
- [3] M. S. Kang, K. T. Kim, "Ground moving target imaging based on compressive sensing framework with single-channel SAR," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 1238-1250, Feb. 2020.
- [4] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 151, no. 4, pp. 203-209, Aug. 2004.
- [5] M. S. Kang, J. H. Bae, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus via minimization of Tsallis entropy," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 6, pp. 2950-2960, Dec. 2016.
- [6] S. H. Lee, J. H. Bae, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus technique using eigenimages," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, pp. 605-616, Feb. 2017.
- [7] B. S. Kang, M. S. Kang, I. O. Choi, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Efficient autofocus chain for ISAR imaging of non-uniformly rotating target," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 17, pp. 5466-5478, Sep. 2017.
- [8] M. S. Kang, S. J. Lee, S. H. Lee, and K. T. Kim, "ISAR imaging of high-speed maneuvering target using gapped stepped-frequency waveform and compressive sensing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 10, pp. 5043-5056, Oct. 2017.
- [9] M. S. Kang, K. T. Kim, "ISAR imaging and cross-range scaling of high-speed manoeuvring target with complex motion via compressive sensing," *IET Radar Sonar and Navigation*, vol. 12, no. 3, pp. 301-311, Mar. 2018.
- [10] M. S. Kang, K. T. Kim, "Compressive sensing approach for high-resolution ISAR image reconstruction and autofocus," in *IET International Radar Conference 2018*, Nanjing, China, Oct. 2018, pp. 17-19.
- [11] M. S. Kang, S. H. Lee, K. T. Kim, and J. H. Bae, "Bistatic ISAR imaging and scaling of highly maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2809-2826, Dec. 2018.
- [12] M. S. Kang, K. T. Kim, "Compressive sensing based SAR imaging and autofocus using improved Tikhonov regularization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5529-5540, Jul. 2019.
- [13] M. Martorella, F. Berizzi, "Time windowing for highly focused ISAR image reconstruction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 3, pp. 992-1007, Jul. 2005.

이 승 재 [한국항공우주연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4527-1619>



2012년 2월: 한양대학교 전자및통신공학 (공학사)
2014년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2018년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학박사)
2018년 3월~현재: 한국항공우주연구원

선임연구원

[주 관심분야] SAR 원격탐사, SAR 표적 탐지/식별, 레이더 신호처리, 간섭 SAR, 다중편파 SAR

이 선 구 [한국항공우주연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3158-4902>



1995년 2월: 충남대학교 천문우주과학과 (이학사)
1997년 8월: 충남대학교 천문우주과학과 (이학석사)
2012년 2월: 충남대학교 천문우주과학과 (이학박사)
2004년 7월~2015년 2월: 한국항공우주연

구원 선임연구원

2015년 3월~현재: 한국항공우주연구원 책임연구원

[주 관심분야] 다중분광위성 절대복사보정, 위성 영상 품질 검토, 고해상도 위성 원격탐사