

# 지상 레이더 기반 인공위성 추적 결과를 활용한 우주상황인식 연구

## Study on Space Situational Awareness Using Ground-Based Radar Satellite Tracking Results

안도진 · 이상현 · 김지훈\*

Dojin An · Sanghyeon Lee · Jihoon Kim\*

### 요약

최근 우주감시 수요와 관심이 증가하고 우주공간의 혼잡도가 심화됨에 따라, 우주 파편, 상업위성, 정찰위성 등을 포함한 다양한 우주물체에 대한 감시 요구가 높아지며 우주상황인식(SSA, space situational awareness)의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 기존 SSA 연구는 주로 광학 센서 기반 관측이나 공개 궤적 요소를 활용한 분석에 집중되며, 실제 지상 레이더 기반 측정데이터를 활용한 실증 연구는 제한적이다. 본 논문에서는 지상 레이더를 이용하여 실제 인공위성을 탐지 및 추적하고, 획득된 추적 결과와 TLE(two-line element) 기반 예측 궤적과 CPF(consolidated prediction file) 기반 예측 궤적과의 차이를 비교하여 수치적 차이를 보인다. 이를 통해 실측 데이터가 기존 궤적 정보 검증, 궤적 변화 감시, SSA 데이터베이스 구축에 활용될 수 있음을 제안한다. 본 연구는 지상 레이더가 독립적인 SSA 센서로 활용할 수 있음을 실증적으로 제시하며, 향후 우주감시체계 및 군사·안보 분야 SSA 역량 강화에 기여할 수 있음을 검증한다.

### Abstract

As the demand for and interest in space surveillance continue to grow and congestion in the space environment intensifies, the need to monitor various space objects, including space debris, commercial satellites, and reconnaissance satellites, has increased, further underscoring the importance of space situational awareness (SSA). Although previous SSA research has largely focused on optical sensor observations or analyses using publicly available orbital elements, empirical studies utilizing actual ground-based radar measurements remain limited. In this study, a ground-based radar system is used to detect and track an operational satellite, and the numerical differences between the obtained tracking results and two-line element (TLE)-based and consolidated prediction file (CPF)-based predicted orbits are compared. The comparison highlights the numerical discrepancies between the measured and predicted orbits, demonstrating that real radar-derived tracking data can support the validation of existing orbital information, the monitoring of orbital changes, and the development of SSA-oriented databases. This study provides empirical evidence that ground-based radar can function as an independent SSA sensor and verifies its potential contribution to strengthening national space surveillance architectures and military space security capabilities.

Key words: Ground Based Radar, Satellite Tracking, Space Situational Awareness (SSA), Two-Line Element (TLE), Orbit Determination

「본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC190064CD).」  
한화시스템(Hanwha Systems)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 4, 2026 ; Revised January 19, 2026 ; Accepted February 9, 2026. (ID No. 20260104-8S)

· Corresponding Author: Jihoon Kim (e-mail: kirana@add.re.kr)

## I. 서 론

최근 저궤도(LEO, low earth orbit)를 중심으로 정찰위성, 통신위성, 지구관측위성의 발사 빈도가 급격히 증가하고 있으며, 그림 1과 같이 우주공간의 혼잡도 및 충돌 위험이 지속적으로 확대되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 환경 변화는 우주공간 간의 안전성과 지속 가능성 확보를 위한 체계적인 감시 능력의 필요성을 증대시키고 있다. 이에 따라 우주공간에서 운용 중인 인공위성 및 우주물체의 상태를 종합적으로 인지하고 관리하는 우주상황인식(SSA)이 핵심 개념으로 부각되고 있다<sup>[2]</sup>. SSA는 단순한 우주물체 목록화(categorize) 수준을 넘어, 지속적인 관측을 통해 궤적 상태 변화를 감시하고 잠재적 위험을 사전에 평가함으로써 의사결정을 지원하는 체계로 발전하고 있다. 특히 군사·안보 분야에서는 독립적인 감시 수단 확보와 정찰위성 활동 감시 측면에서 SSA 역량이 중요한 전략적 요소로 인식되고 있다<sup>[3]</sup>. 일반적으로 SSA는 아래의 네 가지 핵심 기능으로 구분된다.

- 1) 탐지(detection)
  - : 우주물체 존재 여부를 최초 확인
- 2) 추적(tracking)
  - : 시간별 위치, 속도 변화 측정
- 3) 특성 분석(characterization)
  - : 물체의 임무 유형, 궤적 특성, 기동 여부 분석
- 4) 위험 평가(assessment)
  - : 충돌 가능성, 궤적 이상, 위협 수준 평가

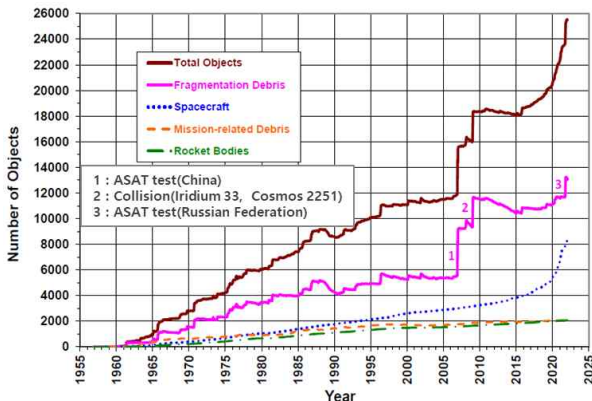


그림 1. 연도별 우주물체 수<sup>[1]</sup>  
 Fig. 1. Annual number of cataloged space objects<sup>[1]</sup>.

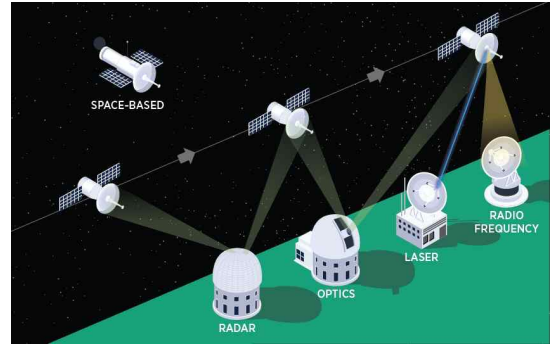


그림 2. 우주감시 방법 분류(우주상황인식 관련 센서)<sup>[4]</sup>  
 Fig. 2. Classification of space surveillance methods (SSA sensors)<sup>[4]</sup>.

지상 레이다는 이 중 탐지 및 추적 단계에서 핵심적인 역할을 수행할 수 있는 센서이다.

우주상황인식 관련 센서 분류는 그림 2와 같으며, 기존 SSA 관련 연구는 광학 센서 기반 관측 시스템<sup>[4]</sup>이나 공개 궤적 요소(TLE, two-line element)를 활용한 궤적 분석에 주로 의존해 왔다. 이러한 접근 방식은 광범위한 감시가 가능하다는 장점이 있으나, 기상 조건, 주야 변화, 궤적 정보 갱신 주기 등의 제약이 있다. 한편, 지상 레이다는 거리 및 속도 정보를 직접 측정할 수 있으며 전천후 운용이 가능하다는 장점을 보유하고 있음에도 불구하고, 실제 위성 측정데이터를 기반으로 SSA 적용 가능성을 분석한 국내 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 레이다의 실제 추적 결과가 SSA에서 어떠한 역할을 수행할 수 있는지에 대한 실증적 분석은 더욱 제한적이다. 최근 레이다 분야에서는 compressive sensing 및 엔트로피 기반 autofocus 기법을 중심으로 한 고정밀 신호처리 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[5]-[8]</sup>. 이러한 기술적 진보는 SAR/ISAR 영상 품질 향상뿐 아니라, 비협조적 우주 물체의 정밀 추적이라는 SSA 분야로의 확장 가능성을 시사한다.

본 연구의 목적은 지상 레이다를 활용하여 실제 인공 위성을 탐지 및 추적한 결과가 SSA에서 어떻게 활용될 수 있는지를 고려함에 있다. 이를 위해 실제 레이다 측정 데이터를 기반으로 추적 결과를 분석하고, SSA 주요 기능과의 연계 가능성을 검토한다.

## II. 본 론

지상 레이더를 이용한 인공위성 탐지는 특정한 위성을 시험 대상으로 선별하여 TLE 기반 예상 궤적 산출 후 집중 탐색(cued) 운용<sup>[9]</sup>을 통해 수행한다. 또한 위성의 이동 특성을 고려한 파형 설계 및 파형 누적(NCI, non-coherent integration) 기법, 추적 필터 적용을 통해 안정적인 추적 데이터를 획득한다<sup>[10]</sup>. 논문 내에 시험 내용과 결과 설명을 위한 용어 정리는 표 1과 같다.

지상 레이더에서 송신된 전자기파가 위성 표면에서 반사되어 수신기로 되돌아오는 신호를 분석함으로써 거리, 속도, 각도(azimuth, elevation), 신호 세기(SNR) 정보를 획득할 수 있으며, 연속 측정을 통해 위성의 궤적 변화를 추정할 수 있다.

지상 레이더를 활용하여 위성을 추적한 시험 결과는 그림 3 및 그림 4와 같다. 관측 장비로 사용된 지상레이더는 S-band 주파수 대역을 사용한다. 시험 대상은 ‘Cryosat 2’ 위성으로 반사경이 부착되었으며, 국제 레이저 거리 측정 서비스(ILRS, international laser ranging service)에서 위성 궤적 고정밀 예측에 사용되는 예측 데이터(CPF, consolidated prediction file)가 제공된다<sup>[11]</sup>. CPF가 제공되는 위성의 추적 결과는 지상레이더 기반 추적 결과의 신뢰성과 TLE 기반의 예측 궤적과의 비교를 위한 기준값으로 높은 활용 가치를 가진다.

표 1. 핵심 용어 정리

Table 1. Definitions of key terms.

Term	Description
SSA	Space situational awareness
TLE	Two-line element
CPF	Consolidated prediction file
RMSE	Root mean square error
NCI	Non-coherent integration
SNR	Signal to noise ratio
SGP4	Simplified general perturbations model 4
SAR	Synthetic aperture radar
ISAR	Inverse synthetic aperture radar
PPI	Plan position indicator

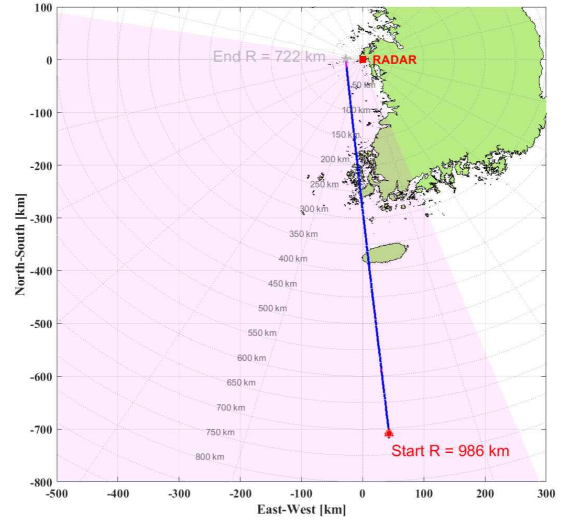


그림 3. 인공위성 추적 궤적(PPI 화면)  
Fig. 3. Satellite tracking trajectory (on PPI display).

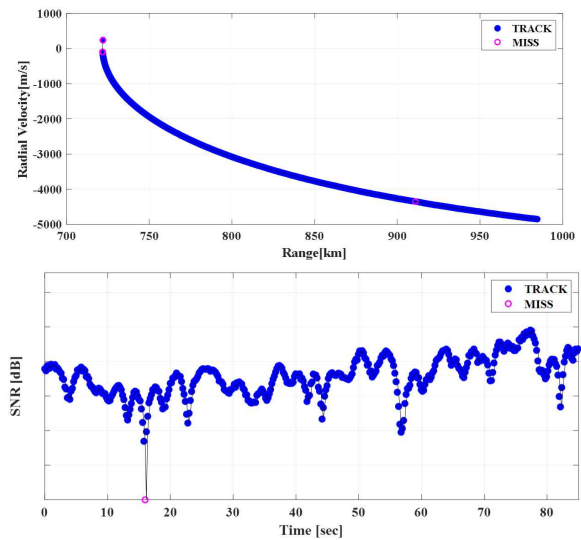


그림 4. 인공위성 추적 결과(SNR 및 거리-속도 그래프)  
Fig. 4. Satellite tracking results (SNR and range-velocity graphs).

시험 결과 약 986 km 지점부터 위성이 탐지되었으며, 추적 고도는 약 717~723 km, 추적거리는 약 722~986 km, 추적 속도는 절대속도의 경우 약 7,300~7,600 m/s이며, 상대속도의 경우 약 -4,800~-97 m/s로 측정되었다. 또한, 지상 레이더가 배치된 위치를 기준으로 관측된 시간은 총 85초이다.

표 2. 예측 궤적 모델별 RMSE(root mean square-error)  
Table 2. Root mean square-error (RMSE) of each trajectory prediction model.

Category	Azimuth (°)	Elevation (°)	Range (m)
Track - TLE	0.3223	0.0580	94.3948
Track - CPF	0.2906	0.0862	45.7052

본 연구에서는 상용 궤적 예측 모델(SGP4 기반 TLE)과 고정밀 위성 관측 지원에 활용되는 CPF 데이터 기반의 예측 궤적과의 비교를 통해 지상 레이더 추적 결과의 상대적 정확도를 정량적으로 분석하였다<sup>[1]</sup>. 표 2는 위성 추적 결과를 CPF 및 TLE 기반 예측 궤적과 RMSE(root mean square-error) 지표로 비교한 결과로 방위각과 거리 기준으로 CPF 기준 RMSE가 TLE 기준 RMSE보다 더 작게 나타났으며, 고각 기준으로는 TLE 기준 RMSE가 더 작게 나타남을 확인하였다.

표 2에서 확인된 RMSE값은 CPF와 TLE 간의 절대적인 정확도 우위를 의미하는 것이 아니라 레이더의 빔 조향 방향과 레이더 측정 불확도에 대한 민감도 차이로 해석할 수 있다. 특히, 고각 성분의 경우 장거리·저고각으로 관측되는 위성의 고도 변화와 대기 굴절 효과 등의 영향을 크게 받는 특성을 갖는다. 또한, 해당 결과는 S-band 레

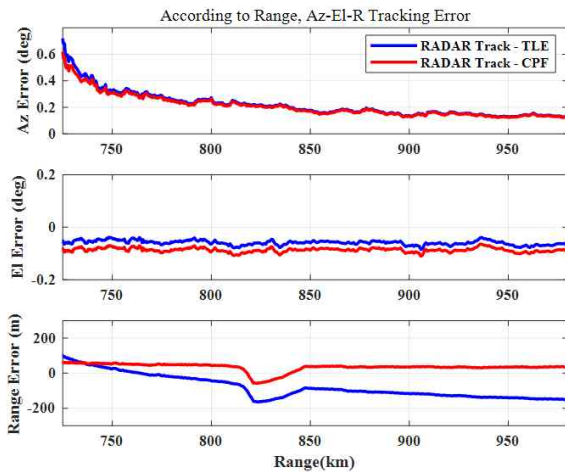


그림 5. 거리별 추적 결과와 TLE, CPF 기반 궤적 비교  
Fig. 5. According to range, comparison of tracking results and TLE/CPF-based orbits trajectory.

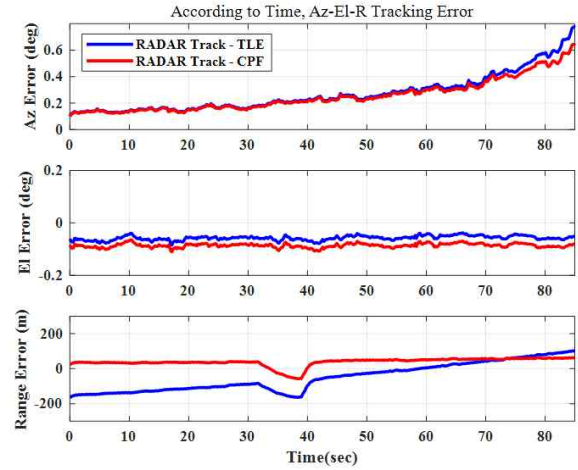


그림 6. 시간별 추적 결과와 TLE, CPF 기반 궤적 비교  
Fig. 6. According to time, comparison of tracking results and TLE/CPF-based orbits trajectory.

이다 장비의 관측 데이터 품질 분석으로 활용될 수 있다.

그림 5 및 그림 6과 같이 추적 결과와 TLE, CPF 기반 예측 궤적과 차이는 전반적으로 유사한 경향을 보였으나, 일부 거리 구간에서는 차이가 발생하였다. 이는 실측 데이터를 이용하여 위성 상태 벡터 추정을 통한 궤적 예측 성능 분석에 활용할 수 있음을 시사한다. 실측 데이터 기

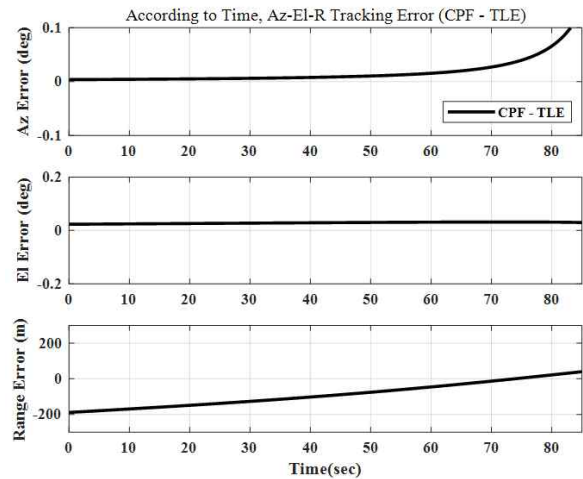


그림 7. 시간별 궤적 예측 모델 간 차이값(CPF-TLE)  
Fig. 7. According to time, temporal differences between orbit prediction models, CPF-TLE.

반으로 일자별 자체 위성 기동에 따른 궤적 보정값 도출과 특정 위성 기준으로 궤적 변화 감시까지 가능할 것으로 예상된다.

또한, 그림 7에서 확인되는 모델 간의 차이를 보정값으로 활용하여 비교적 낮은 정밀도를 갖는 것으로 알려진 TLE 기반으로 초기 궤적 결정 시 정밀도 향상을 기대할 수 있다. 더 나아가 CPF 예측 궤적과 TLE 예측 궤적 간의 차이는 SSA 체계에서 궤적 예측 불확실성과 충돌 위험 평가의 한계를 정량적으로 보여주는 지표로서, 관측 기반 보정 및 SSA 체계 고도화의 필요성을 제시하는 중요한 의미를 가진다. 추가적으로 본 논문의 결과 비교를 위한 예측 궤도 생성 시뮬레이션은 알고리즘 성능 검증이 아닌, 실제 관측 결과의 해석을 보조하기 위한 수준으로 제한하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 지상 레이더를 활용하여 실제 인공위성을 탐지/추적한 결과를 보였으며, 이를 통해 지상 레이더가 우주 상황인식에 핵심 센서로 충분히 활용될 수 있음을 시험하였다. 이를 통해 지상 레이더가 SSA의 탐지 및 추적 기능을 효과적으로 지원할 수 있는 신뢰성 있는 관측 수단임을 확인하였다.

결론적으로 본론에서 제시한 위성 추적 결과가 우주상황인식(SSA)에 활용될 가능성을 총 3가지로 제안한다.

#### 1) 궤적 이상 및 기동 여부 확인

레이더의 거리, 속도, 각도 측정값을 통한 궤적 비교로 위성 기동이나 비정상 궤적 변화를 유추 및 감지할 수 있다.

#### 2) 궤적 예측 보정을 통한 위성 탐지 절차에 활용

CPF가 제공되는 제한적인 위성을 대상으로 지상 레이더 기반 실측 데이터 확보를 통해 기존 궤적 정보의 신뢰성을 검증하고 보완할 수 있다. 특히 실측 데이터는 궤적 예측 오차를 감소시킬 수 있으며 TLE 데이터를 업데이트하고 보정할 수 있다. 이를 통해 관측 장비가 더 정밀한 위성 탐지 성능을 보유할 수 있다.

#### 3) 위성 추적 결과 데이터베이스화 및 SSA 체계 확장

장기간 누적 측정을 통해 궤적 이력 데이터베이스 구축이 가능하며, 이는 충돌 예측 및 위험 평가의 기초 자료

로 활용될 수 있다.

본 연구는 지상 레이더가 독립적인 SSA 센서로 활용할 수 있음을 실증적으로 제시하였다. 향후 다중 센서 융합 기반 SSA 체계, 실시간 궤도 업데이트 알고리즘, 민군 연계 우주상황인식 체계로의 확장이 가능할 것으로 판단된다.

### References

- [1] NASA, *Orbital Debris Quarterly News*, Houston, TX, National Aeronautics and Space Administration (NASA), vol. 26, no. 1, 2022.
- [2] E. J. Choi, S. Cho, J. H. Jo, J. H. Park, T. Chung, and J. Park, et al., "Performance analysis of sensor systems for space situational awareness," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, vol. 34, no. 4, pp. 303-313, Dec. 2017.
- [3] Y. Jung, T. Cho, "Trends in the development of space surveillance radar and strategies for effective acquisition," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 304-310, Jun. 2025.
- [4] Defense Intelligence Agency (DIA), "Challenges to security in space: Space reliance in an era of competition and expansion," AD1082341, Oct. 2019.
- [5] M. S. Kang, J. M. Baek, "Compressive sensing-based Omega-K algorithm for SAR focusing," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 4003405, Jan. 2025.
- [6] M. S. Kang, J. M. Baek, "Effective denoising of InSAR phase images via compressive sensing," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 17, pp. 17772-17779, May. 2024.
- [7] M. S. Kang, "Robust ISAR autofocus via Newton-based Tsallis entropy minimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 22, p. 3505905, Aug. 2025.
- [8] M. S. Kang, J. M. Baek, "Robust ISAR autofocus for nonuniformly rotating target," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 4, pp. 8972-8983, Aug. 2025.
- [9] N. M. Kim, J. W. Kim, and D. J. An, "Operational concept for space surveillance radar," *Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science Technology*, vol. 6, no. 1, Feb. 2024.

[10] J. Kim, S. Y. Hong, "Satellite detection and tracking method of the ground based long range radar," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 109-116, Feb. 2025.

[11] J. Kim, S. Y. Hong, "Radar performance verification method using satellite tracking for ground based long range radar," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 125-134, Apr. 2025.

안 도 진 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4962-9179>



2017년 2월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2019년 8월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
2020년 3월~현재: 한화시스템 선임연구원  
[주 관심분야] RF 시스템, 레이더 시스템

김 지 훈 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0003-6714-3735>



2009년 2월: 충남대학교 전파공학(공학사)  
2011년 2월: 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)  
2011년 1월~2014년 10월: 국방기술품질원 연구원  
2025년 8월: 충남대학교 전파공학화(공학박사)

2014년 10월~현재: 국방과학연구소 책임연구원  
[주 관심분야] 디지털, 레이더 시스템

이 상 현 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-4493-6221>



2023년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2023년 4월~현재: 한화시스템 연구원  
[주 관심분야] 디지털, 레이더 시스템