

FOV(Field-of-View) 분석을 통한 우주감시레이다의 탐색 펜스 요구사항 도출 방안 연구

Extraction of Requirements for the Search Fence of Space Surveillance Radar with Field of View Analysis

문현욱 · 조인철 · 염재명 · 손성환 · 최은정* · 최진* · 유지웅* · 조성기*

Hyun Wook Moon · In Cheol Cho · JaeMyoung Yeom · Sung Hwan Sohn · Eun Jung Choi* ·
Jin Choi* · Jiwoong Yu* · Sungki Cho*

요 약

최근 전 세계적인 우주개발 및 우주위험 증가 추세에 따라 국내에서도 광역 및 상시감시가 가능한 우주감시레이다 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 막대한 개발 비용이 투입되는 국내 우주감시레이다의 효율적 개발을 위해서는 해외 선진 사례 분석을 바탕으로 우주감시레이다에 대한 요구사항을 적절하게 도출할 필요가 있다. 본 논문에서는 선진 사례인 미국 Space Fence 우주감시레이다에 대한 분석을 기반으로 탐색 펜스에 대한 FOV(field-of-view)를 설정하고, 이에 따른 일일 최대 관측가능 표적개수 및 탐지지속가능시간의 누적분포를 도출하고, 이에 대해 분석함으로써 향후 국내 우주감시레이다 개발 시 탐색 펜스에 대한 요구사항 도출 방안을 제시하였다.

Abstract

Recently, as global space development and space risk have increased, in Korea, considerable attention has been diverted to the development of space surveillance radar (SSR) capable of wide-area and full-time monitoring. For the efficient development of domestic SSR, which is usually expensive, it is necessary to appropriately derive the requirements for SSR based on analyses of overseas advanced cases. In this study, based on an analysis of the space fence surveillance radar in the USA, the field of view for the search fence was set. By deriving and analyzing the maximum number of observable targets per day and the cumulative distribution of the duration of detection, a method was developed to derive the requirements for the search fence when developing a domestic SSR in the future.

Key words: FOV(Field-of-View), Search Fence, SSR(Space Surveillance Radar), Radar Requirements

I. 서 론

전 세계적으로 우주개발에 대한 관심이 증가하면서 우주위험 또한 급격히 증가하고 있는 상황이다. 이렇게 증

「이 연구는 2018년도 한국천문연구원 우주위험대응기술연구의 ‘우주감시레이다 프로토타입 설계 연구’의 지원을 받아 수행되었음.」

엘아이지넥스원 레이더연구소(Radar Laboratory, LIG Nex1)

*한국천문연구원 우주위험감시센터(Center for Space Situational Awareness, Korea Astronomy and Space Science Institute)

· Manuscript received July 11, 2022 ; Revised July 29, 2022 ; Accepted August 30, 2022. (ID No. 20220711-002S)

· Corresponding Author: Hyun Wook Moon (e-mail: hyunwook.moon2@lignex1.com)

가하는 우주위협에 대비하기 위해 미국, 유럽 등 선진국에서는 우주 자산의 보호와 자국민의 안전 확보를 위한 우주감시체계 구축에 많은 노력을 기울이고 있다^{[1][2]}. 우주감시체계는 주로 광학시스템, 레이더시스템으로 구분되며, 광학시스템은 긴 감시거리, 저렴한 개발비용, 높은 정밀도의 장점을 갖는 반면, 협소한 감시영역 및 기상조건 등의 제약으로 상시감시가 불가능한 단점이 있다. 이와 달리 레이더시스템은 상대적으로 낮은 정밀도, 짧은 감시거리, 고가 장비이지만 광역 및 상시감시가 가능한 장점이 있다^[3]. 국내에서는 제 1차 우주위협대비 기본계획 실행에 따라 광학시스템은 기 확보하였으나 우주감시레이더 시스템 확보가 필요한 상황으로 최근 우주감시레이더 개발에 대한 관심이 증가하고 있다^[4].

막대한 개발 비용이 투입되는 국내 우주감시레이더를 효율적으로 개발하기 위해서는 해외 선진 사례에 대한 분석을 바탕으로 우주감시레이더에 대한 요구사항을 적절하게 도출할 필요가 있다. 특히 여러 레이더 성능 요구사항 항목 중 레이더의 FOV(field-of-view)는 운용개념 및 표적 특성을 반영하여 설정되어야 최적의 성능을 발휘할 수 있다.

본 논문에서는 해외 선진 사례인 미국 Space Fence 우주감시레이더의 운용개념 및 빔 운용에 대해 알아보고, 이를 기반으로 국내 우주감시레이더 탐색 펜스의 방위각, 고각, 탐지거리별로 일일 최대 관측가능 표적개수 및 탐지지속가능시간의 누적 분포를 도출하였다. 이를 통해 향후 개발될 우주감시레이더의 탐색 펜스에 대한 요구사항 도출 및 설계에 반영함으로써 국내 상공을 지나가는 우주물체에 대해 효율적으로 탐지/추적이 가능한 우주감시레이더 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 탐색 펜스에 대한 FOV 설정

2-1 Space Fence 우주감시레이더 FOV 및 빔 운용

미국 Lockheed Martin사에서 개발 완료한 Space Fence 우주감시레이더는 갈수록 증가하고 있는 우주물체를 효율적으로 탐지/추적하기 위해 그림 1과 같이 부채꼴 모양의 탐색 펜스를 운용하고 있다^[1].

면배열 능동위상배열레이더 형태로 개발된 Space Fence

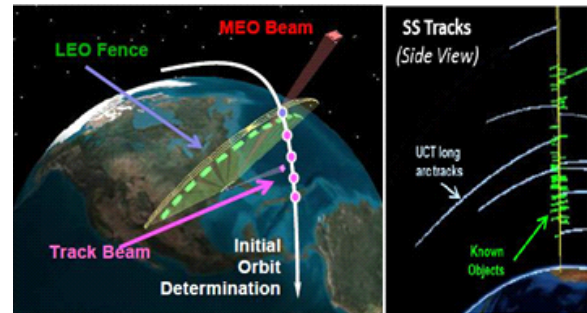


그림 1. Space Fence 우주감시레이더의 탐색 펜스 및 추적 빔 운용^[1]

Fig. 1. The operation of search fence and track beam of Space Fence surveillance radar^[1].

우주감시레이더는, 안테나 boresight인 천정을 기준으로 방위각/고각 방향에 대해 각각 $\pm 60^\circ$ (총 120°)의 탐지 범위인 FOV를 갖는다^[5]. 또한 송신 안테나 36,000개, 수신 안테나 86,000개로 이루어져 있어 배열 이론 적용 시 송신 빔 폭은 약 $0.5 \sim 0.8^\circ$, 수신 빔 폭은 약 $0.3 \sim 0.5^\circ$ 로 추정 가능하다. 따라서 하나의 송신 빔에 대해 수신 다중 빔을 이용해 수신한다고 가정하고, 빔 겹침을 고려하지 않더라도 FOV 전 영역을 탐색하기 위해서는 22,500개 이상의 레이더 탐색 빔이 필요하게 된다. 이에 더해 LEO 영역이 고도 2,000 km까지이기 때문에, 파형상으로도 긴 PRI(pulse repetition interval)가 필요함을 고려하면 매우 긴 탐색시간(frame time)이 필요하게 된다. 반면, LEO 영역의 우주물체는 7 km/sec 이상의 매우 고속으로 이동하므로, 긴 탐색시간은 탐색 중 표적이 FOV를 빠져나가거나, 최초 탐지 실패 시 재탐지가 어려워 우주물체 탐지/추적 성능을 떨어뜨리게 된다.

Space Fence 우주감시레이더는 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 1과 같이 FOV 전 영역을 탐색하지 않고 탐색 펜스를 형성하여, 그 내에서 탐색 빔을 운용하다가 탐색 펜스를 통과하는 우주물체를 탐지하면 추적 빔을 통해 우주물체의 궤적을 획득하도록 운용하고 있다. 위와 같이 운용하면 탐색 펜스 설정에 따라 탐색 범위가 감소하여 전체 관측 가능 우주물체의 수는 감소하지만, 탐색 펜스에 대한 탐색시간이 감소하여 고속으로 이동하는 우주물체에 보다 효율적으로 대응 가능한 장점이 있다. 따라서 국내 우주감시레이더 개발 시에도 탐색 펜스를 설

정하고 운용할 필요가 있다. 그러나 이처럼 탐색 펜스를 운용하고자 할 경우, 탐색 펜스에 대해 두 가지 요구사항 및 설계 결정이 필요하다. 그 하나는 탐색 펜스의 방향이고, 또 다른 하나는 탐색 펜스의 폭이다.

2-2 우주감시레이다 탐색 펜스의 FOV 설정

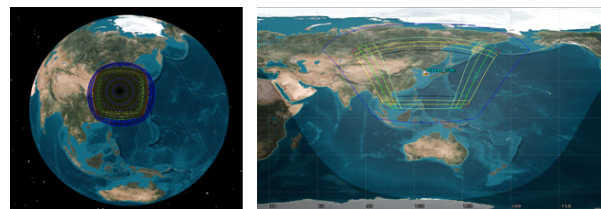
앞에서 살펴본 탐색 펜스의 방향과 폭에 대한 요구사항 결정을 위해 탐색 펜스에 대한 FOV를 표 1과 같이 설정하였다. 방위각은 경도 방향이 되고, 고각은 위도 방향이 되며, 120°는 레이다 안테나면의 boresight 기준 $\pm 60^\circ$ 를 나타낸다. 이 분석에서 FOV 전 영역을 탐색할 때 FOV 크기에 따른 결과를 기준으로 제시하기 위해서 FOV1~FOV3은 방위각/고각 범위를 120°, 90°, 60°로 조정하여 설정하였다. 또한 탐색 펜스 설정 시 탐색 펜스의 방향 및 폭에 따른 결과의 경향을 확인하기 위해서 90°를 기준으로 FOV4~FOV6은 고각 방향 FOV 폭을 10°씩 감소하여 설정하고, FOV7~FOV9는 방위각 FOV 폭을 10°씩 감소하여 설정하였다.

그림 2는 표 1의 탐색 펜스에 대한 FOV를 STK(system tool kit)를 통해 설정하였을 때 형상을 나타내며, STK를 통해 방위각, 고각, 탐지거리에 대한 FOV별로 하루 동안 FOV를 통과하는 우주물체의 수 및 FOV에 머무는 시간(duration time)을 도출하였다. 탐지거리는 우주물체가 가장 많이 존재하고 우주감시레이다의 탐지거리 제한을 고려하여 LEO(low earth orbit) 영역인 1,000~2,000 km 내

표 1. 탐색 펜스에 대한 FOV 설정

Table 1. The FOV setting for search fence.

Classification	Azimuth angle [°]	Elevation angle [°]
FOV1	120	120
FOV2	90	90
FOV3	60	60
FOV4	90	80
FOV5	90	70
FOV6	90	60
FOV7	80	90
FOV8	70	90
FOV9	60	90



(a) 3D

(b) 2D

그림 2. 우주감시레이다 FOV 설정 형상

Fig. 2. The configuration of FOV setting for the space surveillance radar.

100 km 단위로 설정하였다.

III. FOV 분석 결과

3-1 일일 최대 관측가능 표적개수 분석 결과

일일 최대 관측가능 표적개수는 STK에서 표 1과 같이 FOV 및 탐지거리를 설정하고, 일일 동안 FOV 내를 이동하는 우주물체 전체 수를 도출하였다. 실제 일일 동안 이동하는 우주물체 수는 날짜 설정에 따라 다소 차이는 있지만 큰 차이는 없었기에 특정 날을 기준으로 도출하였다. 또한 실제 레이다 운용 시 탐지거리는 표적 RCS(radar cross section)에 따라 달라지지만, 우주감시레이다는 RCS가 가장 작은 우주 파편을 기준으로 설계되기에 표적별 RCS 특성은 반영하지 않았다.

이러한 도출 과정에 따라 그림 3은 최대탐지거리별

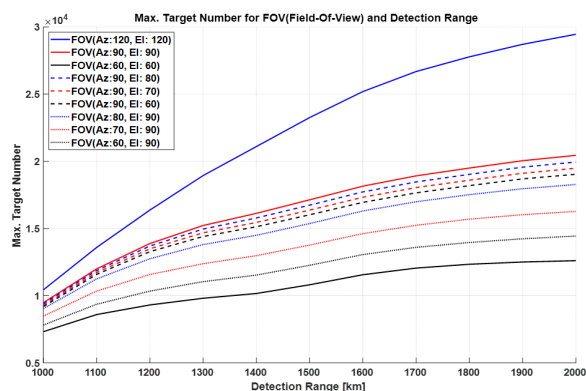


그림 3. FOV 설정에 따른 일일 최대 관측가능 표적개수

Fig. 3. The maximum number of observable targets according to the FOV setting.

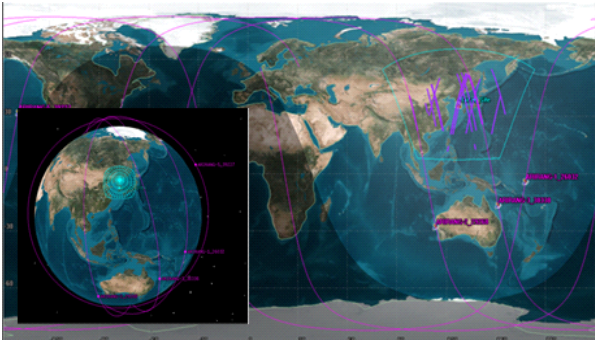
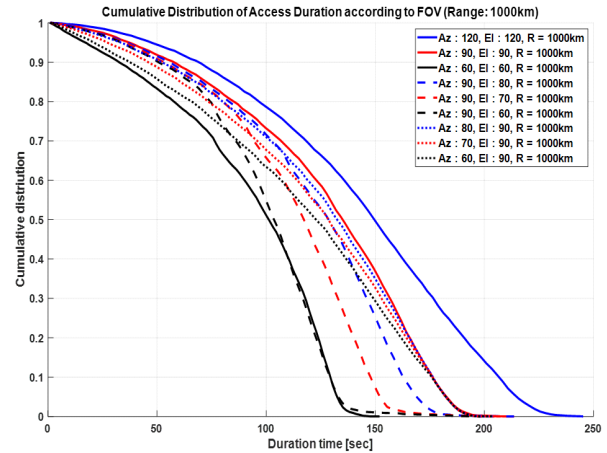


그림 4. 우주감시레이다 FOV 및 우주물체의 기동 특성
Fig. 4. The FOV of SSR and maneuvering characteristics of space objects.

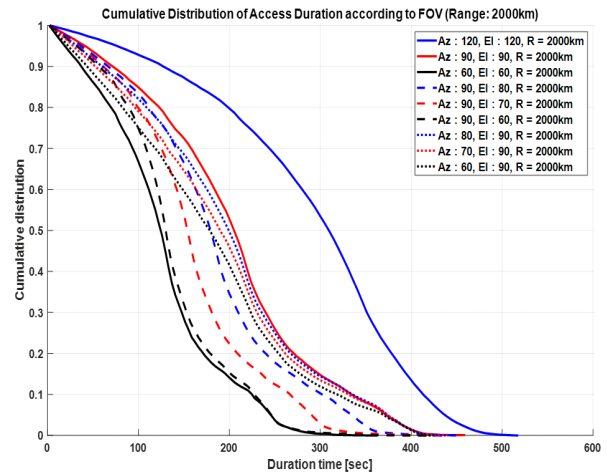
FOV 설정에 따른 일일 최대 관측 가능 표적 개수를 나타낸다. 그 결과를 살펴보면, FOV가 클수록 당연히 관측 가능 표적개수가 증가함을 나타낸다. 그러나 동일 FOV 면적에 대해 방위각 방향 폭을 조정했을 때와 고각 방향 폭을 조정했을 때 관측가능 표적개수는 차이가 발생하였다. 방위각 방향으로 FOV 폭을 감소시켰을 경우 고각 방향 FOV 폭을 감소시켰을 경우 대비 관측가능 표적개수가 급격히 감소하였다. 그 이유는 그림 4와 같이 우주물체의 기동 특성과 연관이 있는데 극지방을 기준으로 우주물체가 위도 방향으로 이동하기 때문으로 이러한 결과는 탐색 펜스의 방향을 방위각 방향인 경도 방향으로 놓고 고각 폭을 조정하여 탐색 펜스를 형성해야 최대한 많은 우주물체를 탐지/추적할 수 있음을 의미한다.

3.2 탐지지속가능시간의 누적분포 분석 결과

앞서 탐색 펜스의 방향을 결정지었다면 탐색 펜스의 폭을 결정해야 한다. 탐색 펜스의 폭이 증가할수록 많은 우주물체를 볼 수 있겠지만 전체 탐색 펜스에 대한 탐색 시간이 증가함에 따라 고속으로 이동하는 우주물체가 그 사이 탐색 펜스를 지나가게 된다면 탐지/추적에 실패하게 된다. 이러한 점을 고려하여 탐색 펜스의 폭을 결정하기 위해 FOV를 통과하는 우주물체의 탐지지속가능시간 누적분포를 도출하였으며, 그림 5는 탐지거리별 탐지지속가능시간의 누적분포를 나타낸다. 그 결과를 살펴보면, 동일 FOV 면적에 대해 고각 방향으로 FOV 폭을 감소시켰을 경우, 약 100초 이후엔 탐지지속가능시간이 급격히



(a) Range: 1,000 km



(b) Range: 2,000 km

그림 5. FOV 설정에 따른 탐지지속가능시간의 누적분포
Fig. 5. The cumulative distribution of the duration of detection according to the FOV setting.

감소하지만, 그 이전에는 방위각 방향 FOV 폭 감소 대비 감소폭이 작았다. 일반적인 레이더 탐지/추적에 필요한 시간이 수초 이내인 점을 고려하면, 이는 고각 방향 FOV 폭 조정이 탐지지속가능시간을 확보하는 데 유리함을 의미한다.

또한 위 결과로부터 탐색 펜스의 폭은 다음과 같이 결정될 수 있다. 안테나 빔 폭이 결정된 후 탐색 펜스의 폭에 따라 탐색 빔 개수 및 탐색시간이 결정된다. 탐색시간이 탐지지속가능시간의 최댓값이 되므로 이를 이용해 누

적분포의 확률을 도출하고, 이를 일일 최대 관측가능 표적개수에 곱하면 실제 탐지/추적이 가능한 표적개수가 도출된다. 이 때 탐색 펜스의 폭을 증가하면 탐색시간이 증가해 확률값은 감소하지만, 일일 최대 관측가능 표적개수가 증가하고 탐색 펜스의 폭을 감소하면 반대가 되므로, 이를 고려한 최적화를 통해 탐색 펜스의 폭을 결정할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 우주감시레이다 탐색 펜스의 FOV에 따른 일일 최대 관측가능 표적개수 및 탐지지속가능시간의 누적분포를 도출하였다. 이를 통해 탐색 펜스를 경도 방향으로 설정하고 위도 방향으로 폭을 조정하는 것이 더 많은 우주물체를 감시하는 데 유리함을 확인하였다. 또한 위 결과로부터 최적화를 통해 실제 탐지/추적이 가능한 표적개수가 최대가 되도록 요구사항 도출 및 설계에 활용할 수 있다.

References

[1] J. A. Haimenl, G. P. Fonder, "Space fence system

- overview," in *16th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, Sep. 2015.
- [2] J. Utzmann, A. Wagner, G. Blanchet, F. Assémat, S. Vial, and B. Dehecq, et al., "Architectural design for a European SST system," in *6th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Apr. 2013, pp. 22-25.
- [3] J. H. Lee, E. J. Cho, H. W. Moon, S. Cho, J. H. Park, and J. H. Jo, "Design of L-band-phased array radar system for space situational awareness," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 3, pp. 214-224, Mar. 2018.
- [4] 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 awarness," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, vol. 34, no. 4, pp. 303-313, Nov. 2017.
- [5] L. Haines, P. Phillip, "Space fence PDR concept development phase," in *12th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui, Sep. 2011.

문 현 옥 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9274-9929>



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2014년 3월~현재: LIG 넥스원 레이더 연

구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 성능분석, 전파전파, 무선채널 모델링

조 인 철 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1940-4761>



2015년 2월: 서원대학교 컴퓨터교육과 (공학사)
2017년 2월: 인하대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
2017년 1월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

통제

염 재 명 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0187-7416>



1992년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학사)
1994년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 7월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 레이더 신호처리

호처리

최 진 [한국천문연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2119-1956>



2007년 2월: 경북대학교 천문대기과학과 (이학사)
2009년 2월: 경북대학교 천문대기과학과 (이학석사)
2018년 8월: 과학기술연합대학원대학교 (이학박사)
2020년 12월~현재: 한국천문연구원 우주

위험감시센터 선임연구원

[주 관심분야] 우주물체궤도결정, 우주물체감시체계, 우주감시레이더

손 성 환 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9401-7182>



2004년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 인하대학교 정보통신대학 (공학석사)
2010년 8월: 인하대학교 정보통신대학 (공학박사)
2011년 1월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 통제, 레이더 성능분석

유 지 응 [한국천문연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7851-3648>



2009년 2월: 연세대학교 천문우주학과 (이학사)
2011년 2월: 연세대학교 천문우주학과 (이학석사)
2017년 8월: 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학박사)
2018년 7월~현재: 한국천문연구원 우주

위험감시센터 선임연구원

[주 관심분야] 우주물체감시레이더 개발, 신호처리, 영상레이더

최 은 정 [한국천문연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3637-2028>



1997년 2월: 연세대학교 천문대기과학과 (이학사)
1999년 2월: 연세대학교 천문우주학과 (이학석사)
2010년 2월: 연세대학교 천문우주학과 (이학박사)
2000년 2월~2005년 1월: 한국항공우주산

업(주) 과장

2005년 4월~2012년 10월: 쉐트렉아이(주) 책임연구원

2012년 11월~현재: 한국천문연구원 우주위험감시센터 책임연구원

[주 관심분야] 우주물체궤도분석, 우주위험도분석, 우주감시체계, 우주감시레이더

조 성 기 [한국천문연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4538-7571>



1990년 2월: 연세대학교 천문기상학과 (이학사)
1995년 6월: Auburn University 항공우주공학과 (공학석사)
1999년 6월: Auburn University 항공우주공학과 (공학박사)
2000년 5월~2004년 9월: 한국전자통신

연구원 선임연구원

2004년 10월~현재: 한국천문연구원 우주위험감시센터 책임연구원

[주 관심분야] 우주물체궤도결정, 우주위험도분석, 우주감시레이더, 우주감시체계