

한국형 발사체의 스킨 추적 성능 향상을 위한 RCS 분석

RCS Analysis for Improving the Performance of the Skin Tracking of KSLV-II

이 현 승*, 이 은 규*, 임 정 택*, 최 지 환**, 김 철 영**

Hyun-Seung Lee*, Eun-Gyu Lee*, Jeong-Taek Lim*, Jee-Hwan Choi**, Chul-Young Kim**

Abstract

In this paper, we calculate monostatic RCS(Radar Cross Section) and bistatic RCS for improving the Performance of the skin tracking of KSLV-II and the results were compared. EM(Electromagnetic) simulator was used for numerical analysis. For the two paths(L, S), after the vehicle was launched, RCS was calculated for region from 280 to 400 seconds. In the case of using the bistatic radar system, when the vehicle was launched to the L path, tracking performance was better when we receive RCS in Jeju than in Goheung. When the vehicle was launched to the S path, tracking performance was better when we receive RCS in Goheung than in Jeju. In the case of using the monostatic radar system, when the vehicle was launched to the L path, tracking performance was better when we receive RCS in Goheung than in Jeju. When the vehicle was launched to the S path, tracking performance was better when we receive RCS in Jeju than in Goheung.

요 약

본 논문은 한국형 발사체(KSLV-II)의 스킨 추적 성능 향상을 위해 모노스테틱 RCS와 바이스테틱 RCS를 계산하고 그 결과를 비교 분석하였다. EM 수치해석을 이용하여 두 가지 경로(L, S)에 대해서, 발사체가 발사된 후 280~400초 구간에 대한 RCS 값을 계산하였다. RCS를 비교 분석한 결과, 바이스테틱 레이더 시스템을 이용할 경우 발사체를 L 경로로 발사할 경우는 제주추적소의 레이더를 수신기로 할 때 고흥추적소의 레이더를 수신기로 할 경우보다 스킨 추적 성능이 우수하였고, S 경로로 발사한 경우는 고흥 추적소의 레이더로 수신할 때 제주 추적소에서 수신할 경우보다 스킨 추적성능이 우수함을 알 수 있었다. 모노스테틱 시스템을 이용할 경우는 L 경로인 경우 고흥 추적소의 레이더를 사용할 경우가 제주 추적소 레이더를 사용하는 것보다 스킨 추적성능이 우수하며, S 경로인 경우는 제주 추적소의 레이더를 사용할 경우 고흥 추적소 레이더를 사용하는 것보다 스킨 추적 성능이 우수한 것을 알 수 있었다.

Key words : Monostatic RCS, Bistatic RCS, Tracking radar, Skin Tracking performance, KSLV-II

* Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University

** NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute

★ Corresponding author

e-mail : cykim@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-5663

※ Acknowledgment

This work was supported by research fund of Chungnam National University.

Manuscript received Oct 5, 2015; revised Nov 17, 2015 ; revised Nov 23, 2015; accepted Nov 27, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

위성발사체 발사에 있어서 가장 중요한 것 중 하나는 발사체의 정확한 궤적을 추적하는 것이다. 이를 위해 고난이도의 환경조건을 고려하고 비행체의 위치를 실시간으로 정확히 확인하기 위해 사용되는 추적레이더의 성능 및 기능 유지는 무엇보다도 중요하다. 현재 나로우주센터 추적레이더는 스킨과 비콘 모드로 분류되어 있고, 두 모드 중 하나의 모드에서만 운용이 가능한 단일 모드 추적방식을 사용하고 있다. 향후 한국형발사체의 발사 임무 상황에서는 발사체를 보다 안정적으로 추적하기 위해 수신기 이중화 개선을 통해 스킨과 비콘 모드를 동시에 사용하는 이중 모드 추적방식을 사용할 계획이다.

이중 모드 추적방식에서는 스킨 모드 추적방식에서의 면밀한 최대추적거리 도출이 필요하고 이에 대한 입력 값 중의 하나인 RCS 분석이 필요하다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 RCS 분석하고 이를 이용해 스킨 모드에서의 최대추적거리를 정확히 예측할 수 있다. 또한 목표한 위치까지 발사체를 추적할 수 있는지를 검토하여 추적가능하도록 추적레이더의 하드웨어 및 소프트웨어의 성능 업그레이드를 위한 사전검토 자료로 사용할 수 있다. 본 논문에서는 스킨 추적향상을 위해 한국형 발사체 형상에 대한 모노스테틱 RCS와 바이스테틱 RCS에 대해 계산하고 분석하였다.

II. 레이더 시스템 및 RCS 계산

1. RCS의 정의 및 최대 수신거리 계산

RCS는 레이더파를 얼마나 잘 반사시키는지 나타내는 척도이다. 레이더로부터 방사되는 파워를 P_i 라 하고 레이더로부터 거리 r 만큼 떨어진 대상의 등방성 재방사 단면적을 σ 라 할 때, 재방사되는 파워 P_s 는 $\frac{\sigma P_i}{4\pi r^2}$ 이 된다. 따라서 RCS (σ)는 $4\pi r^2 \frac{P_s}{P_i}$ 이 된다. 즉 RCS는 단위 면적당 입사된 파워와 전 방향으로 반사된 파워의 비로 식 (1)과 같이 간략하게 정의할 수 있다.^{[1][2]}

$$RCS(\sigma) = \frac{P_s}{P_i/4\pi r^2} \tag{1}$$

가. 모노스테틱 레이더 시스템

모노스테틱 레이더는 그림 1과 같이 송신기와 수신기가 동일한 위치에 있다.^[3]

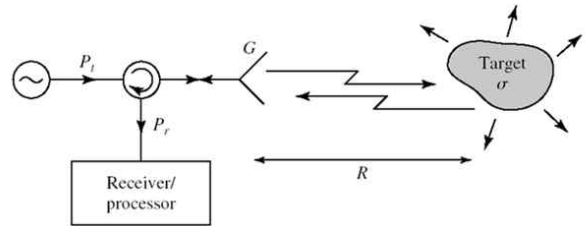


Fig. 1. Monostatic radar system geometry
그림 1. 모노스테틱 레이더 시스템의 구조

모노스테틱 레이더 시스템에서의 수신 전력 (P_r)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = P_t G \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \frac{G}{4\pi} \lambda^2 \tag{2}$$

여기서, P_t 는 송신 전력이며, G 는 안테나의 Gain 이고 σ 는 모노스테틱 RCS이다. 최대 수신거리는 식 (3)과 같이 모노스테틱 RCS와 최소 수신 전력비로 나타낼 수 있다.^[4]

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r_{min}}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{3}$$

나. 바이스테틱 레이더 시스템

바이스테틱 레이더의 기본 개념은 1950년대에 개발되었다. 하지만 모노스테틱 레이더 시스템에 비해 기술적으로 복잡하여 선진국에서 실제 연구하고 제작한 것은 1990년대 후반부터 시작되었다. 그리고 최근에는 컴퓨터 기술의 발전으로 복잡한 계산을 수행할 수 있게 되어 바이스테틱 레이더 기술은 이론뿐만 아니라 실제 구현이 가능하게 되었다. 뿐만 아니라 TV 방송 송신기, SAR 영상 획득 및 표적 구분, 항공 레이더, 침입 감지 센서 등 여러 분야에 걸쳐 바이스테틱 레이더가 활발히 연구되어지고 있다.^[5]

바이스테틱 레이더는 그림 2와 같이 송신기와 수신기가 서로 분리 되어 있다. 현재 나로우주센터에는 고흥과 제주에 추적 레이더 2기가 운용

되고 있으므로 바이스테틱 RCS를 이용한 발사체 추적 가능성이 가능하다.

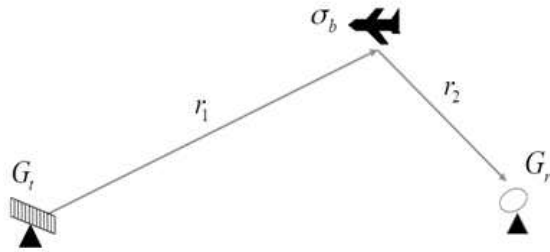


Fig. 2. Bistatic radar system geometry
그림 2. 바이스테틱 레이더 시스템의 구조

바이스테틱 레이더 시스템에서의 수신 전력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = P_t G_t \cdot \frac{1}{4\pi r_1^2} \cdot \sigma_b \cdot \frac{1}{4\pi r_2^2} \cdot \frac{G_r}{4\pi} \lambda^2 \quad (4)$$

여기서, P_t 는 송신 전력이며, G_t , G_r 는 송신, 수신안테나의 Gain이고 σ_B 는 바이스테틱 RCS이다. 최대 수신거리는 식 (5)와 같이 바이스테틱 RCS와 최소 수신 전력비로 나타낼 수 있다.^[6]

$$(R_T R_R)_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_B}{(4\pi)^3 P_{r \min}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

2. 한국형 발사체의 근사화 모델링

한국형 발사체의 RCS를 계산하기 위하여 발사체의 각 형상을 근사화 모델링하였다. 그림 3은 한국형 발사체 형상에 대한 근사화 모델링을 보여준다. 한국형 발사체가 발사되면 제일 먼저 1단이 발사 후 약 128초에서 분리되고 그 후 2단은 발사 후 약 270초에서 분리된다. 따라서 발사체 형상에 따른 RCS 계산은 첫 번째 전체 형상과 두 번째로 1단 분리후의 발사체 형상, 그리고 셋째로 2단 분리후의 발사체 형상에 대해 이루어져야 한다. 한국형 발사체의 스킨 추적에 있어 2단 발사체의 분리직전까지는 추적이 충분히 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 한국형 발사체의 스킨 추적에 대해 가장 관심이 있는 2단 발사체 분리 후(발사 270초 후)의 모델에 대해 RCS를 구하였다.

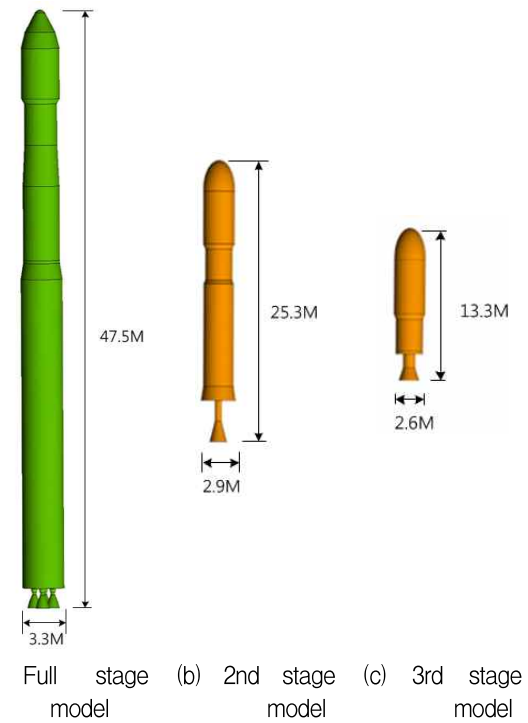


Fig. 3. Approximate modeling of the KSLV-II
그림 3. 한국형 발사체의 근사화 모델링

3. RCS 계산

발사체의 RCS는 물체 주위의 전자기파 산란 현상의 직접적인 결과로 이를 해석하기 위하여 전자기학의 기본 방정식인 Maxwell 방정식을 이용한다. Maxwell 방정식을 이용한 레이더 단면적을 예측하는 기법에는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 이 방정식을 직접 수치적으로 해석하여 레이더 단면적을 예측하는 직접 수치해석 기법(Numerical Methods)과 다음으로 각종 가정을 기초한 고주파 근사기법(High frequency approximation)으로 나눌 수 있다. 직접 수치해석 기법은 저주파수를 비롯한 전 주파수 영역으로 고려할 수 있고, 기본 물리 법칙에 기초한 방식이기 때문에 근사 기법을 적용하기 어려운 모서리나 틈새 부근의 현상을 정확하게 계산할 수 있다. 그리고 복잡한 형상, 다양한 재질에서 계산이 가능한 장점이 있다. 하지만 해석시간이 길고 고사양의 컴퓨터 시스템의 필요로 하는 단점이 있다. 고주파 근사적 기법은 광학영역(Optical Region)에 가까운 고주파 영역에서만 해의 정확도를 보장하고 특정 물리적인 현상을 다룰 수 없어 제한적이지만 비교적 계산시간이 적게 걸리므

로 비행체의 초기설계 단계에서 RCS가 고려되어야 할 때 많이 사용된다. 근사적 기법으로 가장 널리 사용되는 방법에는 물리광학 기법(Physical Optics; PO), 물리광학 회절이론(Physical Theory of Diffraction; PTD), 기하광학 기법(Geometrical Optics; GO), 기하광학 회절이론(Geometrical Theory of Diffraction; GTD) 이 있다. 한국형 발사체의 총길이는 47.5M이며 추적레이더의 주파수는 5.5GHz이므로 해석하고자 하는 발사체의 크기는 약 870λ 로 매우 크다. 직접 수치적으로 계산하는 Full-wave solution인 MOM 기법으로 한국형 발사체의 RCS를 해석하는 것은 시간과 시스템 메모리가 너무 많이 소요된다. 본 논문에서는 고주파 근사기법 중 일반적으로 가장 많이 사용되는 PO기법을 이용하였고, newFasant 수치 해석 툴을 사용하여 RCS를 계산하였다.^[7]

가. 모노스테틱 RCS 계산

표 1은 시뮬레이션에 대한 기본 정보이다. 추적레이더의 주파수가 5.3GHz~5.8GHz 이므로 중심주파수는 5.5GHz를 사용했고, 입사파는 전계가 theta 방향으로 향하고 있는 평면파(theta polarization plane wave)를 사용했다. 그림 4는 2단 분리후의 발사체 형상에 대해 설계한 3D 모델과 입사파 해석궤적을 나타낸 것이다. 발사체의 롤 방향에 대해서는 균일한 특성을 가지므로 발사체의 기축 방향을 기준으로 Z축에서부터 각도 변화에 따른 모노스테틱 RCS를 시뮬레이션 하였다.

Table 1. Information of simulation

표 1. 시뮬레이션 정보

Item	Contents
Tools	newFasant 6.2.1
Frequency	5.5GHz
Incident wave	theta polarization plane wave
Analysis Method	PO(Physical Optics)
PC Resource	Intel Xeon E5-2690 v2 CPU 3.0GHz(core10), 128GB RAM

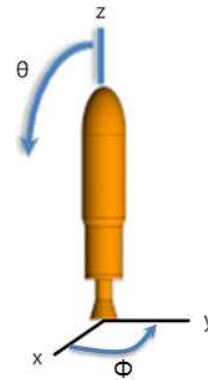


Fig. 4. Analysis trajectory of incident wave
그림 4. 입사파의 해석 궤적

나. 바이스테틱 RCS 계산

바이스테틱 RCS값을 구하기 위해서는 발사체의 꼬리부분의 연장선과 레이더가 이루는 콘각(θ_A, θ_B)과, 송신기와 발사체가 이루는 면과 수신기와 발사체가 이루는 면사이의 각도인 phi(ϕ)값을 알아야 한다. 그림 5는 발사체의 자세에 따른 콘각(θ_A, θ_B)과 phi(ϕ)를 보여준다.

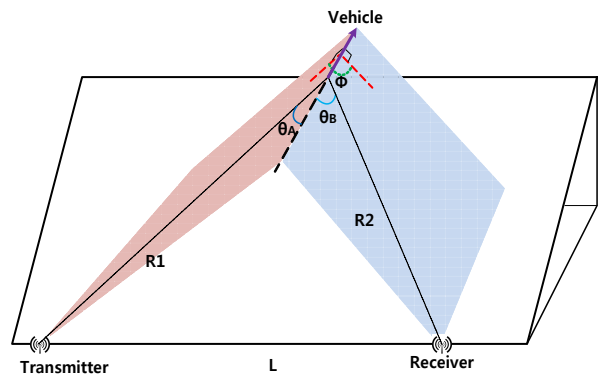


Fig. 5. Cone angle and phi angle associated with the vehicle positions
그림 5. 발사체의 자세와 관련된 콘각과 파이각

시뮬레이션 정보는 모노스테틱 RCS와 같이 동일하며, 표 1과 같다. 현재 나로우주센터에는 고흥과 제주에 추적 레이더 2기가 운용 되고 있으므로 바이스테틱 RCS를 이용하여 발사체를 추적할 수 있다. 발사체의 경로는 현재 계획 중 인 두 가지 경로 L경로와 S경로 대해 RCS를 구했고, 발사체 발사 후 280초부터 400초까지 5초 단위로 RCS를 구하였다. 5초 단위로 계산한 이유는 발사체가 5초 이동할 때 ϕ 각이 약 1도씩 변화되었기 때문이다.

III. RCS 분석

2단 분리후의 발사체 형상에 대해서 RCS의 한 값 (point)을 계산하기 위해 걸린 시뮬레이션 시간은 약 1 분이 소요 되었다. 그림 6은 수신레이더 기준으로 고흥 추적소일 때 즉, 고흥 추적소의 레이더에서 수신하고 제주 추적소의 레이더에서 송신 했을 때, L경로에 대한 모노스테틱과 바이스테틱 RCS를 비교한 그래프이다. 시간에 따라 모노스테틱 RCS 값에 비해 바이스테틱 RCS 값이 크게 요동치는 것을 알 수 있다.

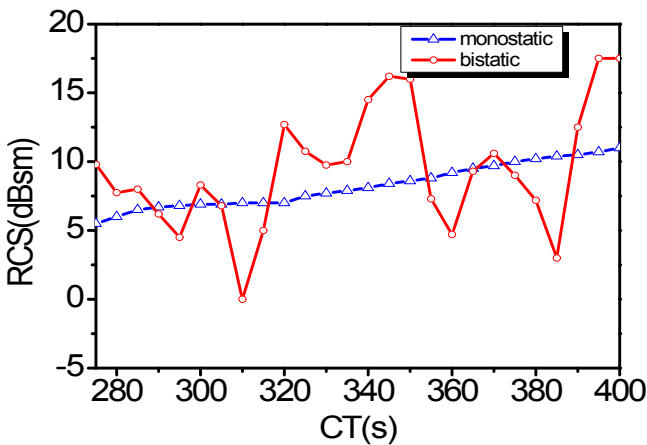


Fig. 6. RCS of L-Route (Goheung tracking center)
그림 6. L 경로의 RCS (고흥 추적소)

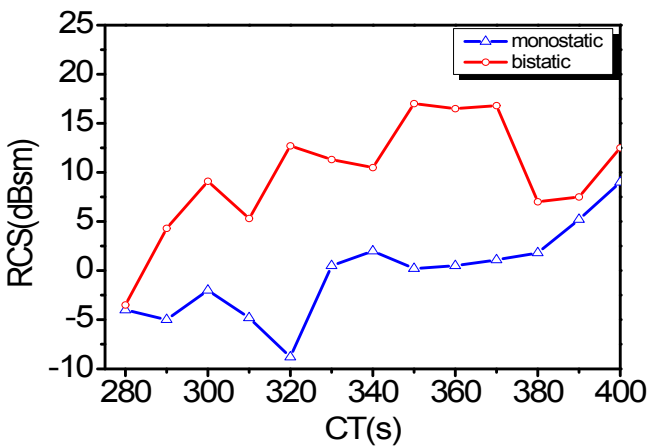


Fig. 7. RCS of L-Route (Jeju tracking center)
그림 7. L 경로의 RCS (제주 추적소)

그림 7은 수신레이더 기준으로 제주 추적소에서 측정했을 때 L경로에 대한 모노스테틱과 바이스테틱 RCS를 비교한 그래프이다. 전체적으로 바이스테틱 RCS가 모노스테틱 RCS보다 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 수신레이

더 기준으로 고흥 추적소에서 측정했을 때 S 경로에 대한 모노스테틱과 바이스테틱 RCS를 비교한 그래프이다. 여기에서도 발사체 발사 후 300초와 340초 부근을 제외하고 대체적으로 바이스테틱 RCS가 모노스테틱 RCS보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 특히 발사체 발사 후 360초 이후부터는 그 차이가 점점 커짐을 확인할 수 있다.

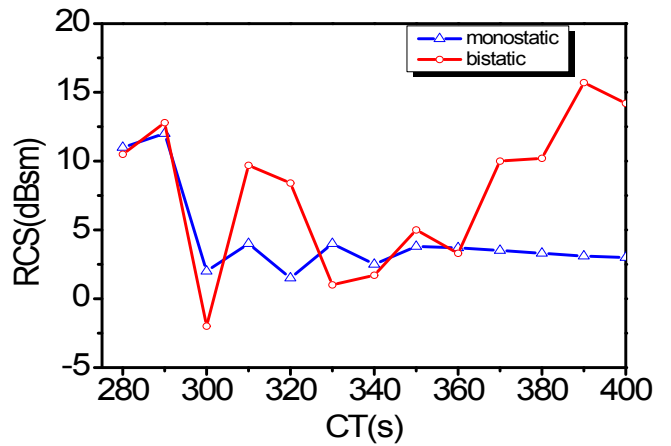


Fig. 8. RCS of S-Route (Goheung tracking center)
그림 8. S 경로에서의 RCS (고흥 추적소)

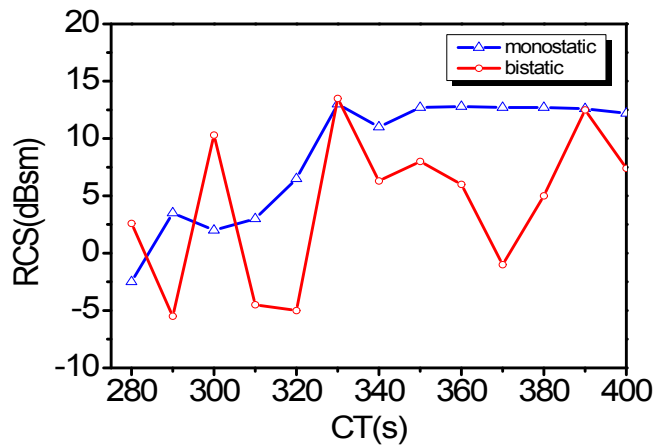


Fig. 9. RCS of S-Route (Jeju tracking center)
그림 9. S 경로에서의 RCS (제주 추적소)

그림 9는 수신레이더 기준으로 제주 추적소에서 측정했을 때 S 경로에 대한 모노스테틱과 바이스테틱 RCS를 비교한 그래프이다. 이번에는 모노스테틱 RCS가 바이스테틱 RCS보다 대체적으로 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 한국형 발사체의 스킨 추적 성능 향상을 위해 모노스테틱 RCS와 바이스테틱 RCS를 발사체 발사 후 280초~400초 까지 발사체 이동경로 L과 S 두 경로에 대해 EM수치해석 프로그램(newFasant)을 이용하여 계산하고 그 결과를 비교 분석 하였다. 분석 결과 L경로에 대해서는 그림 7과 같이 제주추적소에서 레이더를 수신할 때 바이스테틱 RCS가 모노스테틱 RCS보다 확연히 큰 값을 가졌고, S 경로인 경우는 고히추적소에서 수신했을 때 바이스테틱 RCS가 모노스테틱 RCS 보다 대체적으로 큰 값을 가졌다. 모노스테틱 RCS가 바이스테틱 RCS보다 큰 값을 가진 경우는 그림 9와 같이 S경로, 제주추적소에서 수신했을 때이다. 또한 바이스테틱 레이더 시스템을 사용하면서 발사체를 L 경로로 발사할 경우는 제주추적소의 레이더를 수신기로 하고 고히추적소의 레이더는 송신기로 할 경우가 고히추적소의 레이더를 수신기로 할 경우보다 스킨 추적 성능이 우수하며, S 경로로 발사한 경우는 고히추적소의 레이더로 수신할 때 제주추적소의 레이더를 수신기로 할 경우보다 스킨 추적 성능이 우수하다고 할 수 있다. 모노스테틱 시스템을 이용할 경우는 L 경로로 발사할 경우 고히추적소의 레이더를 수신기로 사용할 경우가 제주추적소의 레이더를 수신기로 사용할 때 보다 스킨 추적 성능이 우수하며, S 경로인 경우는 제주추적소의 레이더를 수신기로 사용할 경우가 고히추적소의 레이더를 수신기로 사용할 때보다 스킨 추적 성능이 우수함을 알 수 있었다.

References

- [1] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, M. T. Tuley, "Radar Cross Section, 2nd Edition", S. P., Inc., 2004
- [2] N. J. Wills, "Bistatic Radar, 2nd Edition", Scitech Pub. Inc., 2007
- [3] D. M. Pozar, "Microwave Engineering, 3rd Edition", New York: Wiley, ch. 7, pp. 748-750,

2005.

- [4] Seong-Wan Kim, Sang-Rae Lee, Jun-Yeon Kim, Geun-Su Ma, "RCS Prediction of KSLV-II Test Vehicle", KSAS vol.11, no. 2, pp. 1766-1769, 2012
- [5] S. J. Lee, I. S. Choi, "Performance Comparison for Radar Target Classification of Monostatic RCS and Bistatic RCS", KIEES, vol.21, no. 12, pp. 1460-1466, Dep. 2010
- [6] K. S. Kim, J. H. Youn, H. G. Yang, Y. S. Chung, W. W. Lee, K. B. Bae, "M & S Tool for Analyzing the Detection Performance in Bistatic Radar", KIEES, vol.22, no. 6, pp. 631-640, jun. 2011
- [7] newFasant, <http://www.fasant.com>

BIOGRAPHY

Hyun-Seung Lee (Member)



1998 : BS degree in Electrical Engineering, Wonkwang University.

2000 : MS degree in Electrical Engineering, Wonkwang University.

2014 : PhD degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

2014~2015 : Postdoctoral Research Fellow in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Eun-Gyu Lee (Member)



2004 : BS degree in Electronics Engineering, Chungnam National University.

2006 : MS degree in Pohang University of Science and Technology (Postech).

2006~2009 : Engineer, Samsung Electronics.

2012~ : Ph.D. student, in Electronics Engineering, Chungnam National University.

Jeong-Taek Lim (Student Member)

2016.02 : To graduate BS degree in electronics engineering, Chungnam National University(CNU).

Jee-Hwan Choi (Member)

1999 : BS degree in Electrical Engineering, Chungnam University.

2005~ : Senior Engineer, Korea Aerospace Research Institute.

Choul-Young Kim (Member)

2002: BS degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

2004 : MS degree in Electrical Engineering, Korea Advanced Institute

of Science and Technology (KAIST).

2008 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST).

2009~2011 : Postdoctoral Research Fellow, in Electrical and Computer Engineering, University of California, San Diego (UCSD)

2011 ~ : Associate Professor, in Electronics Engineering, Chungnam National University.