

비동기 다중 레이더 융합을 통한 실시간 궤도 추정 알고리즘

송하룡*, 문병진*, 조동현*

Real time orbit estimation using asynchronous multiple RADAR data fusion

Ha-Ryong Song*, Byoung-Jin Moon*, Dong-Hyun Cho*

Abstract

This paper introduces an asynchronous multiple radar fusion algorithm for space object tracking. To estimate orbital motion of space object, a multiple radar scenario which jointly measures single object with different sampling time indices is described. STK/ODTK is utilized to determine realization of orbital motion and joint coverage of multiple radars. Then, asynchronous fusion algorithm is adapted to enhance the estimation performance of orbital motion during which multiple radars measure the same time instances. Monte-Carlo simulation results demonstrate that the proposed asynchronous multi-sensor fusion scheme better than single linearized Kalman filter in an aspect of root mean square error.

초 록

본 논문에서는 비동기 다중 레이더의 추적데이터 융합을 통한 우주 물체 추적 알고리즘을 소개하였다. 지구궤도에 분포되어 있는 우주 물체 추적을 위하여 다중의 레이더를 사용한 추적 시나리오를 설정하였고, 각 레이더의 우주 물체 추적을 위하여 선형화 칼만 필터를 사용하였다. 샘플링 시간이 서로 다른 다중 레이더의 데이터를 융합하기 위해서 각각의 레이더에서 측정 가능한 범위를 STK/ODTK를 사용하여 결정하고, 다중 레이더가 동시에 우주 물체를 추적 하는 시간 동안 칼만 필터 기반의 비동기 융합 알고리즘을 적용하여 우주 물체의 궤도를 추정하였으며, 시뮬레이션을 통해 다중 레이더 융합을 통한 궤도 추정의 성능을 분석하였다.

키워드 : Orbit estimation(궤도 추정), Asynchronous fusion(비동기 융합), Multiple tracking radar (다중 추적 레이더), Linearization(선형화)

접수일(2014년 9월 5일), 수정일(1차 : 10월 22일), 게재 확정일(2014년 11월 1일)

* 교신저자, IT융합기술팀/hrsong@kari.re.kr * IT융합기술팀/bjmoon@kari.re.kr * IT융합기술팀/dhcho99@kari.re.kr

1. 서 론

우주 궤도상에 있는 각국의 인공위성과 국제 우주정거장과 같은 대형 우주 구조물을 우주과편과의 충돌로부터 지키기 위해서는 우주 물체 목록(SOC, space object catalog)에 대한 정확한 상태 정보 추정이 수반 되어야 한다[1]. 일반적으로 지구 저궤도상의 우주물체를 정밀하게 측정하여 궤도 정보를 추정하기 위해서는 레이더가 사용된다. 레이더는 관측 범위 내 광역 지역을 조사하여 우주 물체를 탐지하고, 궤도를 추적할 수 있는 시스템으로서, 광학 시스템과 달리 기상 및 시간의 제약 없이 전천후 감시가 가능하고 미 식별 물체에 대한 조기탐지 및 추적이 용이하다. 이러한 장점 때문에 미국과 유럽을 주축으로 하여 전 세계적으로 우주 감시 레이더망이 구축되어 있고 이러한 레이더 데이터에 의해 SOC는 관리되고 있다. 일반적으로 레이더를 사용한 SOC의 유지를 위해서는 최소 자승법(batch least squares estimation)이 사용되는데, 최소 자승법의 경우 사용 가능한 모든 데이터를 전 세계 각국의 추적 장비에서 수집하여 일괄로 처리하기 때문에 SOC 관리에는 유용하지만, 일괄처리의 특성상 실시간 처리가 불가능한 단점이 있다[2]. 반면 칼만필터(KF, Kalman filter)와 같은 순환필터의 경우 실시간 처리는 가능하지만, 일괄 처리 방법과 달리 중복된 관측 범위에 대한 데이터를 처리하기 위해서는 별도의 융합 알고리즘을 적용할 필요가 있다. 선형화 칼만 필터를 이용한 융합 알고리즘은 개발 되었지만, 다중 레이더가 서로 동기화 되어 있다는 가정이 전제되어 있다[3]. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 연구에서는 관측 범위가 중복되는 2개 이상의 다중 레이더 데이터를 효율적으로 융합하여 실시간, 고성능의 궤도 융합 추정 알고리즘을 제안 하였다. 다중 레이더를 사용한 관측 범위 내 우주 물체 측정 데이터 추출 및 우주 물체 궤도 생성을 위하여 AGI사의 STK/ODTK를 사용하였고, 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 분석하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 우주 궤도를 운동하는 물체의 운동방정식 및 레이더의 관측 모델에 대해 설명하고, 3장에서는 비동기 융합 알고리즘에 대해서 설명하였다. 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 성능을 확인하고, 마지막으로 5장에서는 결론을 정리하였다.

2. 문제 설정

2.1 우주물체 궤적 방정식

지구 저궤도 상에서 운동하는 물체의 궤적 방정식은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[2].

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}, \quad \dot{\mathbf{v}} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} + \mathbf{a}_G + \mathbf{a}_D, \quad (1)$$

위식에서 $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$, $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ 는 각각 위치 벡터와 속도 벡터를 나타내고 주어진 초기 값 \mathbf{r}_0 , \mathbf{v}_0 에 의해 우주 물체의 거리와 속도가 결정된다. μ 는 중력 상수를 나타내고, \mathbf{a}_G , \mathbf{a}_D 는 각각 지구 중력장과 공기 밀도에 의한 외란을 나타낸다. 우주 물체의 직교 좌표계 상 위치 및 속도 값을 갖는 상태 벡터 $\mathbf{X} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ 를 위의 수식 (1)에 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{X}}_t = f(\mathbf{X}) + \mathbf{a}_G + \mathbf{a}_D \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_t = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ -\frac{\mu}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^3} x \\ -\frac{\mu}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^3} y \\ -\frac{\mu}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^3} z \end{bmatrix} + \mathbf{a}_G + \mathbf{a}_D$$

2.2 레이더를 통한 관측 방정식

지상에 위치한 레이더에 의한 우주물체의 관측 위치 벡터는 레이더의 위치 벡터와 레이더의 거리 측정값에 의해 다음과 같이 결정된다[2].

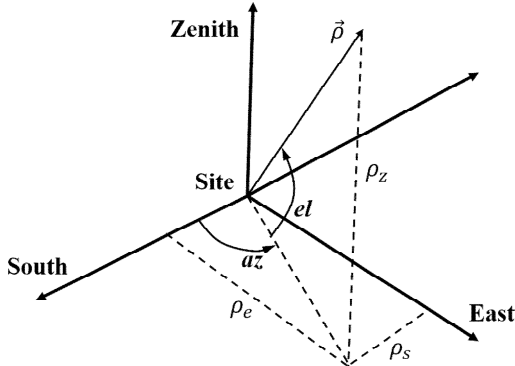


그림 1. 우주물체 관측을 위한 레이더 좌표계

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}_{site} + \rho \quad (3)$$

위 식에서 $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ 이고 레이더 위치에서 거리 측정값 ρ 와 방위각 az , 고각 el 은 SEZ (south, east, zenith) 좌표계로 표현 시 그림 1과 같고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho = \sqrt{\rho_s^2 + \rho_e^2 + \rho_z^2}, \quad (4)$$

$$az = \tan^{-1} \frac{\rho_s}{\rho_e}, \quad el = \tan^{-1} \frac{\rho_z}{\sqrt{\rho_e^2 + \rho_s^2}}.$$

비동기 다중 레이더 데이터 생성을 위하여, N 개의 레이더가 서로 다른 sampling rate와 초기 측정 시간을 가지고 레이더의 커버리지 내 우주물체를 관측하는 시나리오를 설정한다. 가장 최근에 센서 융합이 이루어진 시간을 t_{k-1} , 다음 센서 융합이 이루어질 시간을 t_k 라 하면, 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안 수집된 레이더 관측 데이터 개수를 N_k 라 할 수 있고 다음과 같이 표현할 수 있다.

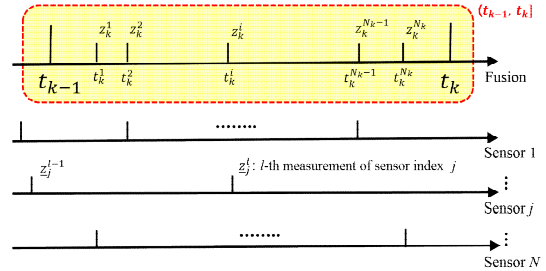


그림 2. 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안 수집된 Raw 데이터

$$N_k = \sum_{j=1}^N n_k^j, \quad (5)$$

위 수식 (5)에서 n_k^j 는 j 인덱스를 갖는 센서의 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안 수집된 센서의 개수를 나타낸다. 그러므로 시간 t_k^i 에서 관측 벡터는 $\{z_k^i\}_{i=1}^{N_k}$ 와 같이 표현할 수 있다. N 개의 센서에 대하여 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2를 통하여 비동기 관측 벡터 z_k^i 는 다음 수식과 같이 쓸 수 있다.

$$z_k^i = H_k^i X(t_k^i) + v_k^i, \quad (6)$$

위 수식에서 H_k^i 와 v_k^i 은 각각 관측 행렬과 공분산 행렬 R_k^i 를 갖는 zero-mean white Gaussian 관측 잡음을 나타내며 관측 벡터는 수식 (4)에서 정의된 물리량의 관측 값으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$z_k^i = h(X(t_k^i)) + v_k^i, \quad (7)$$

$$= [\rho \ az \ el]^T + v_k^i,$$

$$R_k^i = \text{diag}[\sigma_{k,r}^i \ \sigma_{k,a}^i \ \sigma_{k,e}^i].$$

위 수식에서 i 는 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 내에서의 레이더 관측 값의 인덱스를 나타낸다. v_k^i 는 i 인덱스를 갖는 레이더의 관측 잡음을 나타낸다. 시

시스템 잡음을 w_k 라고 할 때 w_k, v_k^i 는 다음과 같이 zero-mean white Gaussian 잡음의 특성을 만족한다.

$$E(w_k w_j^T) = \delta_{kj} Q_k, \quad E(v_k^i v_j^{iT}) = \delta_{kj} R_k^i, \quad (8)$$

$$E(v_k^i w_j^T) = 0, \text{ for all } k, j.$$

융합 공식 유도를 위하여 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 내에서의 관측 벡터 및 전체 관측 벡터는 각각 수식 (9)와 (10)과 같이 정의한다.

$$Z_k \equiv \{z_k^i\}_{i=1}^{N_k} \quad (9)$$

$$Z^k \equiv \{Z_m\}_{m=1}^k \quad (10)$$

3. 비동기 센서 융합 알고리즘

우주 물체의 궤도 추정을 위한 비동기 다중 센서 융합 알고리즘은 주어진 비동기 센서 데이터 Z^k 에 대하여 최적 상태 추정치와 에리 공분산 행렬을 구하는 것이다. 수식으로 표현하면 아래와 같다[4].

$$\hat{X}_k^f \equiv E[X(t_k)|Z^k], \quad (11)$$

$$P_k^f \equiv cov[X(t_k)|Z^k].$$

3.1 융합 알고리즘 계산을 위한 설정

시간 t_k^i 에서 t_k 로의 상태 천이 행렬을 $\Phi(t_k, t_k^i)$ 라 하고 관측 벡터를 적체하여 다음과 같은 값을 정의한다.

$$\bar{H}_k^i \equiv H_k^i \Phi^{-1}(t_k, t_k^i) \quad (12)$$

$$\bar{\eta}_k^i \equiv v_k^i - \bar{H}_k^i w(t_k, t_k^i)$$

$$z_k \equiv [(z_k^1)^T (z_k^2)^T, \dots, (z_k^{N_k})^T]^T$$

$$H_k \equiv [(\bar{H}_k^1)^T (\bar{H}_k^2)^T, \dots, (\bar{H}_k^{N_k})^T]^T$$

$$\eta_k \equiv [(\bar{\eta}_k^1)^T (\bar{\eta}_k^2)^T, \dots, (\bar{\eta}_k^{N_k})^T]^T$$

수식 (12)에 의해 시간 간격 $(t_{k-1}, t_k]$ 동안의 비동기 다중 레이더로부터의 관측 벡터 집합 $\{z_k^i\}_{i=1}^{N_k}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z_k = H_k X(t_k) + \eta_k \quad (13)$$

위 수식에서 적체된 관측 잡음 η_k 또한 백색 가우시안 잡음 특성을 갖고 다음과 같은 공분산 행렬을 갖는다.

$$R_k = \begin{bmatrix} R_k^1 + \bar{H}_k^1 Q(t_k, t_k^1) (\bar{H}_k^1)^T & \dots & \bar{H}_k^1 Q(t_k, t_k^{N_k}) (\bar{H}_k^{N_k})^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{H}_k^{N_k} Q(t_k, t_k^{N_k}) (\bar{H}_k^{N_k})^T & \dots & R_k^{N_k} + \bar{H}_k^{N_k} Q(t_k, t_k^{N_k}) (\bar{H}_k^{N_k})^T \end{bmatrix}$$

시스템 (2)의 이산화를 통하여 얻게 되는 시스템 잡음 $w(t_k, t_{k-1})$ 도 백색 가우시안 잡음 특성을 나타내고, 다음과 같은 수식을 만족한다.

$$E[w(t_k, t_{k-1}) w^T(t_l, t_{l-1})] = Q(t_k, t_{k-1}) \delta_{kl}$$

또한 이산화된 시스템 잡음 $w(t_k, t_{k-1})$ 과 적체된 관측 잡음 η_k 는 서로 연관되어 있으므로 둘 간의 상호 공분산은 다음과 같이 계산된다.

$$E[w(t_k, t_{k-1}) (\bar{\eta}_k^i)^T] \quad (14)$$

$$= -E[w(t_k, t_{k-1}) w^T(t_k, t_k^i)] (\bar{H}_k^i)^T$$

$$= -Q(t_k, t_k^i) (\bar{H}_k^i)^T,$$

$$cov[w(t_k, t_{k-1}), n_l] = S_k \delta_{kl}$$

$$S_k = [-Q(t_k, t_k^1)(\bar{H}_k^1)^T, \dots, -Q(t_k, t_k^{N_k})(\bar{H}_k^{N_k})^T]. \quad (15)$$

3.2 최적 비동기 융합 알고리즘

수식 (12)~(14)를 통해 다이나믹 시스템 (2)에 대한 시간 t_{k-1} 에서의 융합 상태 추정치 \hat{X}_{k-1}^f 와 공분산 P_{k-1}^f 을 구하기 위한 최적 비동기 융합 알고리즘은 다음과 같다[4].

$$\hat{X}_{k|k-1}^f = \Phi(t_k, t_{k-1})\hat{X}_{k-1}^f \quad (16)$$

$$P_{k|k-1}^f = \Phi(t_k, t_{k-1})P_{k-1}^f\Phi^T(t_k, t_{k-1}) + Q(t_k, t_{k-1}) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}_k^f &= \hat{X}_{k|k-1}^f + P_k^f[H_k + S_k^T(P_{k|k-1}^f)^{-1}]^T \\ &\times [R_k - S_k^T(P_{k|k-1}^f)^{-1}S_k]^{-1}(z_k - H_k\hat{X}_{k|k-1}^f) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (P_k^f)^{-1} &= (P_{k-1}^f)^{-1} + [H_k + S_k^T(P_{k|k-1}^f)^{-1}]^T \\ &\times [R_k - S_k^T(P_{k|k-1}^f)^{-1}S_k]^{-1} \\ &\times [H_k + S_k^T(P_{k|k-1}^f)^{-1}]. \end{aligned} \quad (19)$$

위 식에서 이산 상태 천이 행렬 $\Phi(t_k, t_{k-1})$ 과 관측 행렬 H_k 는 수식 (2)와 (7)의 비선형 함수 f_k 와 h_k 의 Jacobian을 통해 각각 다음과 같이 선형화 한다[5].

$$\Phi(t_k, t_{k-1}) = \left[\nabla_{x_{k-1}} f^T(X_{k-1}) \right]^T | X_{k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1}^f \quad (20)$$

$$H_k = \left[\nabla_{x_k} h_k^T(X_k) \right]^T | X_k = \hat{X}_{k|k}^f$$

where

$$\nabla_{x_k} = \left[\frac{\partial}{\partial x_k} \quad \frac{\partial}{\partial y_k} \quad \frac{\partial}{\partial z_k} \quad \frac{\partial}{\partial x_k} \quad \frac{\partial}{\partial y_k} \quad \frac{\partial}{\partial z_k} \right]$$

4. 시뮬레이션

본 장에서는 비동기 다중 레이다 융합 알고리즘을 통한 우주 물체 추적 성능을 시뮬레이션을 통해 평가 하였다. 저궤도의 우주물체 궤적을 STK/ODTK를 통해 표 1과 같은 초기값을 사용하여 Two body 운동에 대한 중력 외란과 공기 밀도를 고려하여 생성 하였다. 융합 필터의 초기 공분산 및 시스템 잡음 $Q(t_k, t_k^i)$ 는 J_2 중력외란에 의한 가속도 성분으로 근사하여 직교좌표에서 위치(km^2)와 속도(km^2/s^2) 성분으로 다음과 같이 설정하였다[1].

$$P_0 = \text{diag}[10^{-1} 10^{-1} 10^{-1} 5^{-3} 5^{-3} 5^{-3}],$$

$$\begin{aligned} Q(t_k, t_k^i) &= (t_k - t_k^i) \\ &\times \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ 10^{-16} \ 10^{-16} \ 10^{-16}]. \end{aligned}$$

표 1. 초기 궤도 요소

Semi-Major Axis	6981.042560 km
Eccentricity	0.000756
True argument of Latitude	36.30796 deg
Inclination	51.604126 deg
RAAN	25.003800 deg
Argument of Perigee	339.491525 deg

표 2 레이다의 위치 및 측정 공분산

RADAR #1			
Position	Latitude	Longitude	Altitude
	30.23 deg	273.78 deg	120m
Noise	Range σ_r^1	Elevation σ_e^1	Azimuth σ_a^1
	30m	0.01 deg	0.01 deg
	RADAR #2		
Position	Latitude	Longitude	Altitude
	28.23 deg	271.78 deg	120m
Noise	Range σ_r^2	Elevation σ_e^2	Azimuth σ_a^2
	30m	0.01 deg	0.01 deg

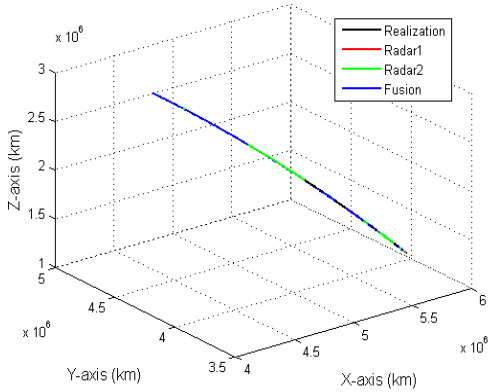


그림 3. 다중 레이더가 동시에 추적 가능한 커버리지 내 우주 물체의 궤적

또한, 시뮬레이션을 위해 2대의 레이더의 위치 및 거리, 각도에 대한 관측 잡음을 표 2와 같이 설정하였다[1]. 다중 레이더가 동시에 물체의 궤적을 관측할 수 있는 시간은 STK/ODTK를 통해 계산 (300 sec)하고 이 시간 동안에 물체의 궤적은 그림 3에서 확인할 수 있다. 2대의 레이더의 비동기 관측 간격은 각각 $\Delta t_1 = 1(\text{sec})$, $\Delta t_2 = 2(\text{sec})$ 로 설정하였고 레이더의 초기 관측 시간은 각각 $t_{1,initial} = 0.8(\text{sec})$ $t_{2,initial} = 1.8(\text{sec})$ 로 가정하여 데이터를 생성하고 Fusion Center에서의 데이터 융합 시간 간격 $\Delta t_f = 3$ 로 설정하였다. ODTK를 사용하여 레이더 데이터를 100회 획득하여 Monte-Carlo시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 각각의 비동기 레이더 데이터에 대한 선형화 칼만 필터[6]와 두대의 레이더에 대한 비동기 융합 필터[4]에 의해 구해진 공분산의 위치 및 속도 벡터 성분의 Trace를 나타낸 것이고, 그림 6과 그림 7은 100회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 얻어진 x, y, z 축의 에러에 대한 절대값의 합을 나타낸 것이다. 그림 4 ~ 그림 7에서 확인할 수 있는 것처럼 개별 레이더의 추적 성능의 경우 관측 간격 시간이 짧으면 상대적으로 더 좋은 추적 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 더욱이 비동기 융합을 통한 우주 물체 추적 성능이 개별 레이더의

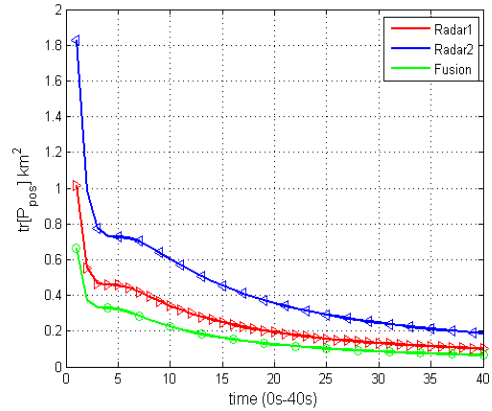


그림 4. 비동기 융합 필터의 공분산(위치)의 대각성분의 합

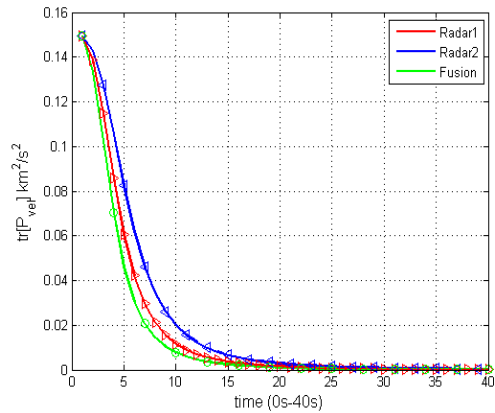


그림 5. 비동기 융합 필터의 공분산(속도)의 대각성분의 합

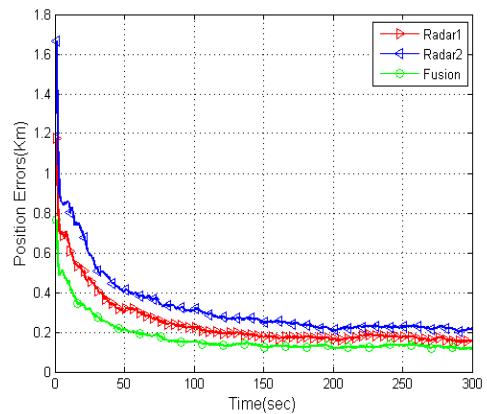


그림 6. 위치 성분 에러의 절대 값 (MC 100 runs)

후 기

본 연구는 기초기술연구회 'NAP 우주물체 전자광학 감시체계 기술개발'의 협동연구과제(우주파편 충돌위험 종합관리시스템 개발 및 우주파편 제거시스템 연구)의 일부로 수행되었으며, 이에 기초기술연구회와 한국항공우주연구원의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. J. Lee and K. T. Alfriend, "Sigma Point Filtering for Sequential Orbit Estimation and Prediction", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 44, No. 2, March-April, 2007.
2. D. A. Vallado, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, McGraw - Hill, New York, 1997.
3. 송하룡, 문병진, 조동현, "다중 레이더 융합을 통한 실시간 궤도 추정 알고리즘", 2014 춘계 한국항공우주공학회논문집.
4. Y. Hu, Z. Duan, D. Zhou, "Estimation Fusion with General Asynchronous Multi-Rate Sensors", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 46, No. 4, Oct. 2010.
5. B. Ristic, S. Arulampalam, N. Gordon, *Beyond the Kalman Filter Particle Filters for Tracking Applications*, Artech House, Boston, 2004.
6. F. L. Lewis, *Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory*, JohnWiley & Sons, New York, 2001.
7. L. Lewis, *Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory*, JohnWiley & Sons, New York, 2001.

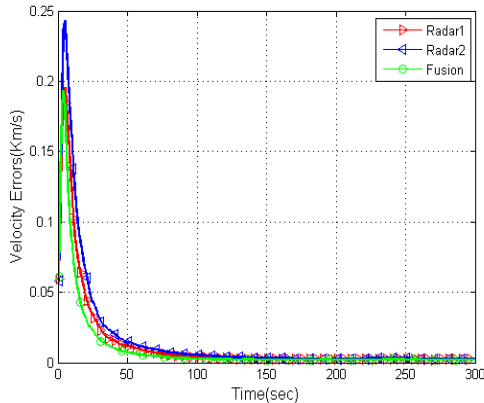


그림 7. 속도 성분 에러의 절대 값 (MC 100 runs)

추적 성능과 비교할 때 100m 이상 향상된 것을 확인 할 수 있다.

5. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 지구 저궤도상에서 궤도 운동을 하는 우주 물체에 대하여 비동기 다중 레이더 시스템을 이용해 궤도 운동 상태를 추정하는 방법을 제안하였다. 우주 물체의 궤도와 다중 레이더의 관측 범위 결정 및 데이터 추출을 위해 상용 툴인 AGI사의 STK/ODTK를 사용 하였다. STK/ODTK를 통해 추출한 비동기 다중 레이더 관측 데이터에 대하여 좌표변환 및 선형화를 수행하여 융합한 후, Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 단일 레이더와 제안된 융합 추정의 추적 성능 비교하여 다중 레이더 융합 알고리즘의 성능을 검증하였다. 향후에는 본 논문에서 적용된 비동기 Centralized fusion 알고리즘의 단점인 알고리즘 연산 부하가 큰 것에 대한 극복을 위하여 비동기 Distributed fusion 알고리즘을 적용 및 테스트하여 연산 부하 성능을 개선할 것이다.