



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(4), 285-293(2020)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.4.285

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

시각 동기화 오차가 SAR 영상에 미치는 영향 분석 및 보상

이수정¹, 박우정², 박찬국³, 송종화⁴, 배창식⁵

Analysis and Compensation of Time Synchronization Error on SAR Image

Soojeong Lee¹, Woo Jung Park², Chan Gook Park³, Jong-Hwa Song⁴ and Chang-Sik Bae⁵Department of Mechanical and Aerospace Engineering/ASRI, Seoul National University^{1,2,3}Avionics Radar Team, Hanwha Systems^{4,5}

ABSTRACT

In this paper, to improve Synthetic Aperture Radar (SAR) image quality, the effect of time synchronization error in the EGI/IMU (Embedded GPS/INS, Inertial Measurement Unit) integrated system is analyzed and state augmentation is applied to compensate it. EGI/IMU integrated system is widely used as a SAR motion measurement algorithm, which consists of EGI mounted to obtain the trajectory and IMU mounted on the SAR antenna. In an EGI/IMU integrated system, a time synchronization error occurs when the clocks of the sensors are not synchronized. Analysis of the effect of time synchronization error on navigation solutions and SAR images confirmed that the time synchronization error deteriorates SAR image quality. The state augmentation is applied to compensate for this and as a result, the SAR image quality does not decrease. In addition, by analyzing the performance and the observability of the time synchronization error according to the maneuver, it was confirmed that the time-variant maneuver such as rotational motion is necessary to estimate the time synchronization error adequately. In order to reduce the influence of the time synchronization error on the SAR image, the time synchronization error must be compensated by performing maneuver changing over time such as a rotation before SAR operation.

초 록

본 논문에서는 Synthetic Aperture Radar (SAR, 합성개구레이다) 영상 품질을 향상시키기 위해 EGI/IMU (Embedded GPS/INS, Inertial Measurement Unit) 통합 항법 시스템에서 발생하는 시각 동기화 오차의 영향을 분석하고 이를 보상하기 위해 상태변수증강 기법을 적용한다. SAR 요동 측정 알고리즘으로 항체의 위치를 추적하기 위한 EGI와 추가적으로 안테나에 장착된 IMU를 결합하는 EGI/IMU 통합 항법 시스템이 많이 이용된다. 이와 같은 EGI/IMU 통합 항법 시스템에서 센서 간의 시계가 동기화되지 않을 경우 시각 동기화 오차가 발생한다. 시각 동기화 오차가 항법 및 SAR 영상에 미치는 영향 분석을 통해 시각 동기화 오차가 SAR 영상 품질을 악화시키는 것을 확인하였다. 이를 보상하기 위해 상태변수증강 기법을 적용하고, 적용한 결과 SAR 영상 품질이 저하되지 않음을 확인하였다. 또한 기동에 따른 시각 동기화 오차 추정 성능과 가관측성을 분석하여 시각 동기화 오차를 효과적으로 추정하기 위해서는 회전 기동과 같은 시간에 따라 변화하는 기동이 필요함을 보였다. 따라서, SAR 영상에 미치는 시각 동기화 오차의 영향을 줄이기 위해서는 SAR 구간 전에 회전 기동 등 시간에 따라 변화하는 기동을 수행하여 시각 동기화 오차를 보상해 주어야 한다.

† Received : December 24, 2019 Revised : March 6, 2020 Accepted : March 24, 2020

¹ Graduate Student, ² Graduate Student, ³ Professor, ⁴ Researcher, ⁵ Researcher³ Corresponding author, E-mail : chanpark@snu.ac.kr, ORCID 0000-0002-7403-951X

© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Key Words : Synthetic Aperture Radar(합성 개구면 레이더), EGI/IMU Integrated System (EGI/IMU 통합 시스템), Time Synchronization Error(시각 동기화 오차)

I. 서 론

고정된 지점에서 신호를 송수신하는 일반적인 레이더 시스템과 달리, SAR(Synthetic Aperture Radar)은 움직이면서 수집한 신호들을 합성하여 영상을 얻는다. 그 결과, SAR은 안테나 길이가 동일한 다른 레이더 시스템보다 더 높은 해상도의 영상을 제공한다[1,2]. 이러한 SAR 시스템에서는 높은 품질의 영상을 얻기 위해 등속직선운행을 따라야 하는데, 이로부터 벗어난 정도를 요동이라 칭한다. 요동을 보상하지 않을 경우, SAR 영상 품질이 악화되기 때문에 요동을 측정하고 보상해야 한다[3,4]. 항공기에는 보통 항공기의 위치를 추적하기 위한 EGI(Embedded GPS/INS)가 무게중심에 장착되어 있고, 추가적으로 SAR 안테나에 상대적으로 저가의 IMU(Inertial Measurement Unit)가 장착되어 있다. SAR 영상 품질을 향상시키기 위해, EGI와 IMU를 결합하는 EGI/IMU 통합 시스템을 이용하는 PEM(Parametric Error Modeling) 등의 알고리즘들이 제시되었다[5,6]. 하지만 EGI/IMU 통합 시스템 등 두 개 이상의 센서를 결합하는 경우, 센서 간 시각 동기화 오차가 발생하고 이는 항법 시스템의 오차를 증가시킨다[7-11]. 따라서, SAR 영상 품질을 향상시키기 위해서는 EGI와 IMU 사이의 시계를 동기화시켜야 한다. 이를 위해 시각 동기화 오차를 추정 및 보상하고자 상태변수증강 기법이 일반적으로 사용된다[12]. 특히, 전단 정렬의 경우, EGI의 속력, 자세 측정치를 이용하여 시각 동기화 오차를 추정하고 보상한다[13,14].

본 연구에서는 EGI/IMU 통합 시스템에서 발생하는 시각 동기화 오차를 정의하고 기동에 따라 항법 시스템에 미치는 영향을 분석한다. 이를 토대로 시각 동기화 오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 분석한다. 그 후, SAR 영상 품질을 향상시키기 위해 시각 동기화 오차를 상태변수증강 기법을 통해 추정 및 보상하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 분석한다. 마지막으로 기동에 따른 시각 동기화 오차의 가관측성을 분석하여 시각 동기화 오차를 효과적으로 추정하는 조건을 찾는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 EGI/IMU 통합 시스템에서의 시각 동기화 오차를 정의하고 시각 동기화 오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 분석한다. III장에서는 시각 동기화 오차를 보상하기 위해 상태변수증강 기법을 적용하고 기동에 따른 가관측성 분석을 통해 시각 동기화 오차를 효과적으로 추정하는 법을 찾는다.

II. 시각 동기화 오차 영향 분석

2.1 분석 방법

2.1.1 시각 동기화 오차의 정의

시각 동기화 오차는 두 개 이상의 센서의 시계가 동기화되지 않은 경우 발생하며, 이 논문에서는 EGI/IMU 통합 시스템의 EGI와 IMU 사이의 시각 동기화 오차를 의미한다. 내장 프로그램을 통해 IMU를 EGI에 직접 연결하여 시계를 동기화 할 수 있는 경우, 문제가 발생하지 않지만 다른 회사 제품을 이용할 경우 대체로 이러한 기능을 제공하지 않는다. 이와 같은 이유로 생성된 시각 동기화 오차는 다양한 형태로 모델링 될 수 있다[8]. 그 중 하나는 IMU와 EGI의 샘플링 속도가 Fig. 1(a)와 같이 서로 일치하지 않을 때 발생하지만 IMU 데이터를 시간에 따라 전파함으로써 보상할 수 있다. IMU 시계의 백색 잡음은 10^{-5} 초 단위로 매우 작아 EGI 위치 오차와 구별할 수 없다. 따라서 본 논문에서 정의된 시각 동기화 오차는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 시각 오프셋, 즉 랜덤 바이어스로 모델링한다.

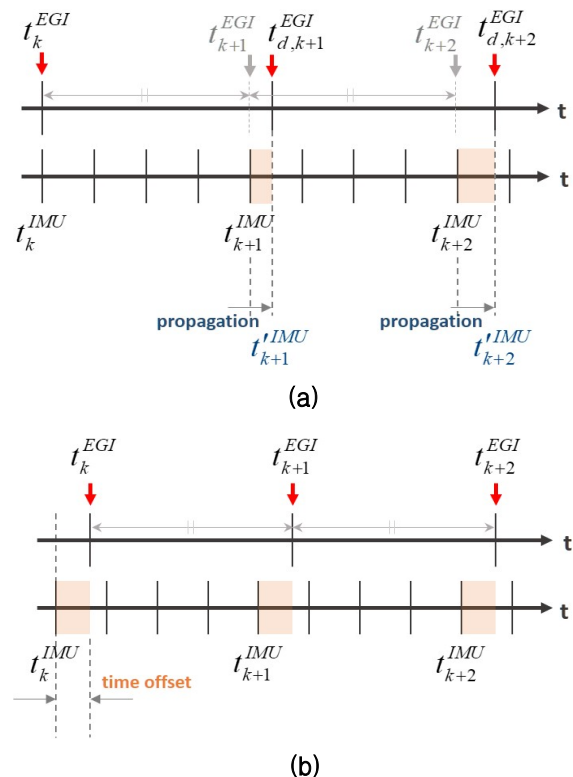


Fig. 1. Visualization of time synchronization error (a) random delay (b) time offset

2.1.2 시뮬레이션 조건

이와 같이 모델링된 시각 동기화 오차의 영향을 분석하기 위해 두 가지 시뮬레이션을 Monte Carlo 시뮬레이션으로 50회 수행하였다. 먼저, 두 시뮬레이션에 공통적으로 적용되는 EGI/IMU 시스템에 사용된 센서 사양은 각각 Table 1과 Table 2와 같다. 위 센서들을 이용하여 앞서 서론에서 소개한 PEM 기법을 SAR 요동 측정 알고리즘으로 적용하여 요동 측정 결과를 생성하였으며, 그 결과를 이용하여 spotlight SAR 시뮬레이터를 통해 SAR 영상과 SAR 품질 지수를 계산하였다. SAR 시뮬레이터에서 사용된 변수들은 Table 3과 같다.

Table 1. EGI specification

Sensor	Parameter	Value ($1-\sigma$)
Accelerometer	Bias	25 μg
	Velocity random walk	2.5 μg
	Sampling rate	50 Hz
Gyroscope	Bias	0.003 deg/hr
	Angular random walk	0.001 deg/rhr
	Sampling rate	50 Hz
GPS	Position accuracy	1 m
	Sampling rate	1 Hz

Table 2. IMU specification mounted on SAR antenna

Sensor	Parameter	Value ($1-\sigma$)
Accelerometer	Bias	200 μg
	Velocity random walk	20 μg
	Sampling rate	200 Hz
Gyroscope	Bias	1 deg/hr
	Angular random walk	0.07 deg/rhr
	Sampling rate	200 Hz

Table 3. Specification of spotlight SAR simulation

Parameter	Value
Pulse repetition frequency	1,000 Hz
SAT	10 sec
Range distance of target area	45 km
Bandwidth	50 MHz

Table 4. Simulation scenarios of maneuver

Time [sec]	20 ~ 40
Linear motion	Linear motion with 100 m/s
Acceleration	Constant acceleration of 5 m/s ²
Rotation	Right turn by 90 deg

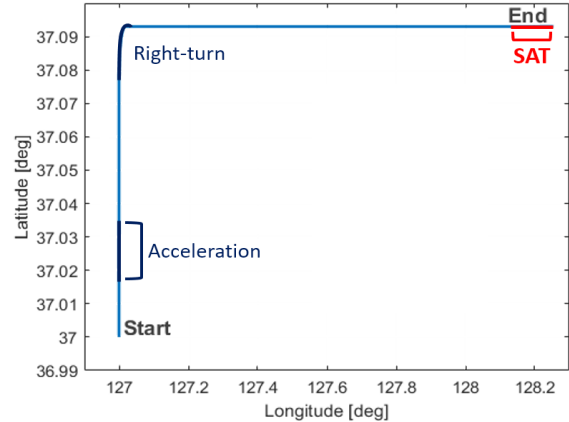


Fig. 2. Simulation trajectory for SAR operation

시뮬레이션 시나리오의 경우, 2.2절에서는 기동에 따라 시각 동기화 오차가 항법 결과의 각 구성 요소에 미치는 영향을 파악하기 위해 등속직선운동, 가속, 회전운동과 같은 여러 기동에 대해 구현되었다. 모든 시뮬레이션은 60초 동안 진행되었으며, 60초 동안 정지상태를 유지하는 정지 궤적을 제외하고는 모든 시뮬레이션은 초기 속도 100m/s로 시작하여 20초 동안 등속직선운동하고 마지막 20초 동안 다시 등속직선운동한다. 두 시간 사이의 20초 동안 Table 4와 같이 기동이 변화한다.

마지막으로 2.3절에서는 시각 동기화 오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 2의 궤적을 따라 500초 동안 진행되는 시뮬레이션을 설계하였다. 항체는 초기 속도 100m/s로 출발하여 20초 후 15m/s²로 10초 동안 가속한 후, 출발시간으로부터 50초가 경과된 시점에서 10초간 90° 우회전하였다. 가속 및 회전 기동을 수행함으로써 EGI/IMU 시스템에서 IMU의 가속도계 바이어스 및 자이로 바이어스의 추정 성능이 확보될 수 있다. 이와 같은 방법으로 SAR 구간 전에 항법 오차를 줄인 후, SAR 요동 측정 알고리즘을 수행함으로써 SAR 영상 품질을 높이고자 하였다. 그 후, 시뮬레이션이 끝날 때까지 항체는 등속직선궤적을 따르고 마지막 10초 동안 SAR 영상 촬영이 수행되었다.

2.2 기동에 따른 시각 동기화 오차의 영향

기동에 따른 효과를 분석하기 전에, 정지한 경우 시각 동기화 오차의 영향이 있는지 확인하였다. Fig. 3과 같이 시각 동기화 오차의 영향이 없다는 것이 확인되었기에 더 이상 분석하지 않는다. 잇따라 기동

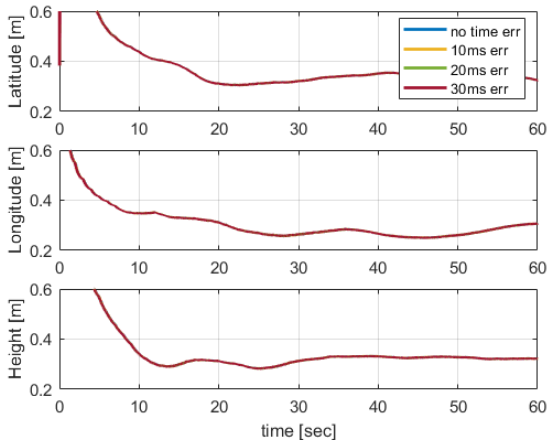


Fig. 3. Position error of stationary state

에 따른 영향을 분석하기 위해 Table 4에 기재된 바와 같이 등속직선운동, 가속 운동, 회전 운동에 대한 영향을 순서대로 분석하였다.

항체가 등속직선운동을 할 경우, 가속도 및 각속도는 시각 동기화 오차의 영향을 받지 않지만, 진행 방향의 위치 오차는 식 (1)과 같이 시각 동기화 오차와 항체의 속력에 비례하여 추가적으로 발생한다. 이는 Fig. 4와 Table 5를 통해 확인할 수 있다.

$$\delta p_T = \delta p + v T_d \quad (1)$$

여기서 δp_T 와 δp 는 각각 시각 동기화 오차가 있는 경우와 없는 경우의 추정위치오차이다. v 는 항체의 속도, 그리고 T_d 는 시각 동기화 오차를 의미한다. 가속 운동의 경우, 자세와 자이로 바이어스는 영향을 받지 않지만, Fig. 5와 Table 6과 같이 가속하는 방향의 속도 오차가 증가하여 가속도계 바이어스 오차와 위치 오차가 증가한다. 시각 동기화 오차로 인한 추

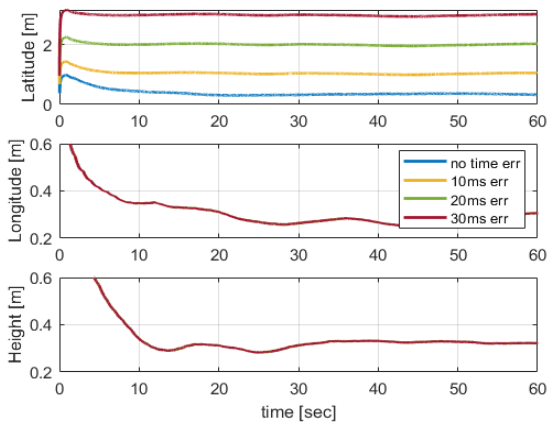
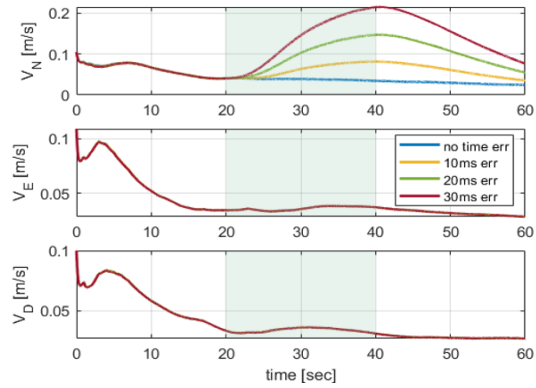


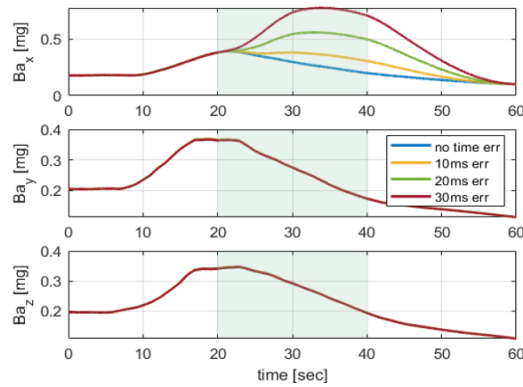
Fig. 4. Position error of linear motion

Table 5. Position error of linear motion

T_d [ms]	0	10	20	30
Latitude [m]	0.3219	1.045	2.019	3.01



(a)



(b)

Fig. 5. Acceleration (a) velocity error (b) acceleration bias error

Table 6. Velocity error of acceleration

T_d [ms]	0	10	20	30
V_N [m/s]	0.03439	0.08124	0.1467	0.2143

가적인 속도 오차와 시각 동기화 오차 사이의 관계는 식 (2)와 같이 나타내어질 수 있다.

$$\delta v_T = \delta v + a T_d \quad (2)$$

여기서 δv_T 와 δv 는 각각 시각 동기화 오차가 있는 경우와 없는 경우의 추정속도오차이며, a 는 가속도를 의미한다.

마지막으로, 회전 기동에 의해 회전축의 자세 오차 및 자이로 바이어스 오차는 Fig. 6과 Table 7과 같이 명확하게 증가하며, 이는 식 (3)에 의해 설명 될 수 있다. 자세 오차에 미친 영향으로 인해, 회전평면의 가속도계 바이어스, 속도 및 위치 오차가 함께 증가한다. 그러나 회전축의 가속도계 바이어스는 Fig. 7과 같이 영향을 받지 않는다.

$$\delta \varphi_T = \delta \varphi + \omega T_d \quad (3)$$

여기서 $\delta \varphi_T$ 와 $\delta \varphi$ 는 각각 시각 동기화 오차가 있는

경우와 없는 경우의 추정자세오차이며, ω 는 각속도를 의미한다. 위의 시뮬레이션을 통해 시각 동기화 오차는 시불변 상태변수에는 영향을 미치지 않고 시간에 따라 변화하는 시변 상태변수에만 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

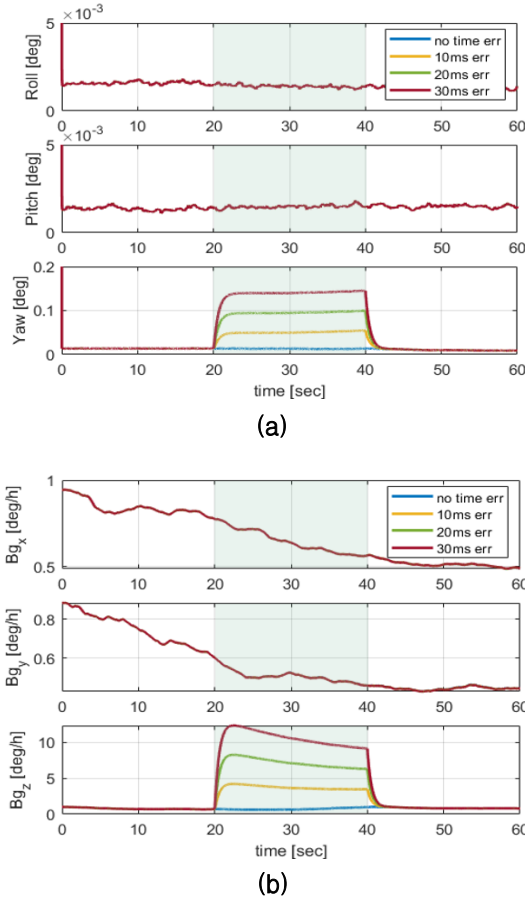


Fig. 6. Rotation (a) attitude error (b) gyro bias error

Table 7. Attitude error of rotation

T_d [ms]	0	10	20	30
Yaw [deg]	0.01347	0.04958	0.09429	0.1396

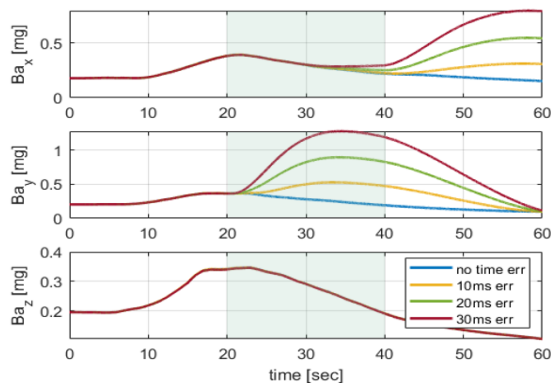


Fig. 7. Accelerometer bias error of rotation

2.3 SAR 영상에 미치는 영향

오차가 보상되지 않았을 때 시각 동기화 오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 분석하기 위해, EGI/IMU 통합 시스템에 시각 동기화 오차가 있고 Fig. 2의 궤적을 이동하는 시뮬레이션을 수행하였다. 항체는 SAR 구간동안 등속직선운동하기 때문에 가속이나 회전 기동에 의한 영향은 존재하지 않고 직선 운동에 의한 영향만 남게 된다. 따라서, 식 (1)과 같이 진행 방향으로 바이어스된 위치 오차가 발생하고 이 추가적인 오차는 Fig. 8과 같이 IRF(Impulse Response Function)를 평행 이동시키고, 이에 따라 SAR 영상도

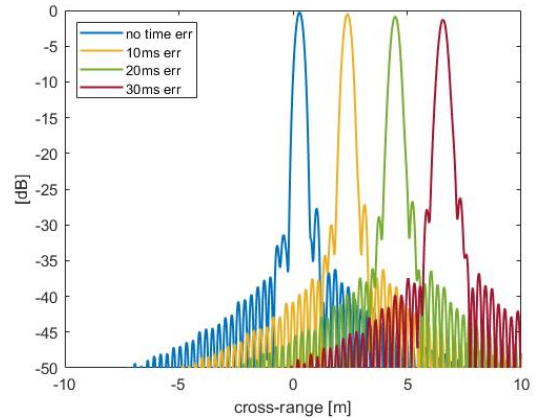


Fig. 8. IRF according to time synchronization error

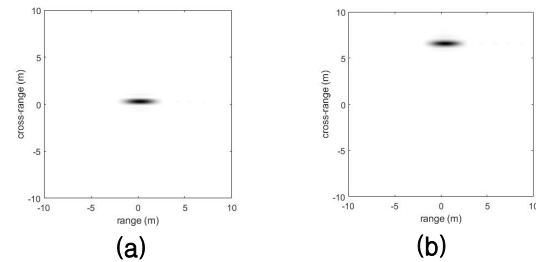


Fig. 9. SAR image (a) no time error (b) 30ms error

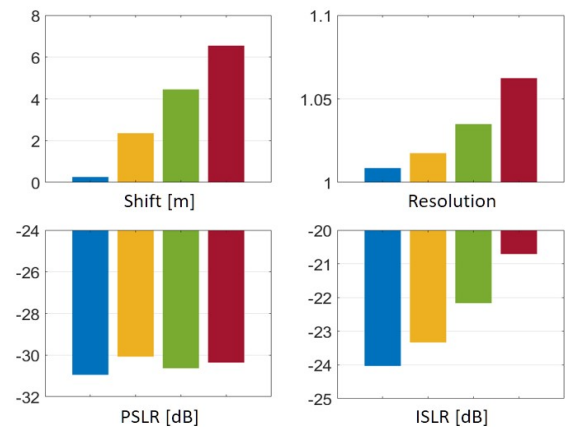


Fig. 10. SAR image quality indices according to time synchronization error

Fig. 9와 같이 평행 이동된다. Fig. 10은 시각 동기화 오차에 따른 SAR 영상 품질 지표들인 평행 이동 (Shift), 해상도(Resolution), PSLR(Peak Side Lobe Ratio), ISLR(Integrated Side Lobe Ratio)의 변화를 나타낸 것이다. 시각 동기화 오차에 의해 전체적인 오차의 크기가 커졌기 때문에 피크 손실이 생겨 영상의 평행 이동뿐만 아니라 해상도와 ISLR 모두 일정한 간격으로 악화된다.

III. 시각 동기화 오차 보상

3.1 상태변수증강 기법

상태변수증강 기법은 일반적으로 사용되는 추정기법으로 EKF(Extended Kalman Filter)의 시스템 모델에 시각 동기화 오차 등 추정하고자 하는 상태변수를 추가하는 것이다[12-14]. 본 논문에서는 시각 동기화 오차를 추정하기 위해 시각 동기화 오차의 추정 오차를 식 (5)와 같이 정의하여 식 (4)와 같이 시각 동기화 오차 항을 포함하는 새로운 상태변수 모델을 설정한다.

$$\delta \mathbf{x}' = [\delta \mathbf{x}^T \ \delta T_d]^T \quad (4)$$

$$\text{where } \delta T_d = \hat{T}_d - T_d \quad (5)$$

여기서 $\delta \mathbf{x}$ 는 위치오차, 속도오차, 자세오차, 가속도계 바이어스 오차, 자이로 바이어스 오차를 포함하는 15차 상태변수 모델이다. \hat{T}_d 는 EKF에 의해 추정된 시각 동기화 오차, T_d 는 실제 시각 동기화 오차이다.

따라서 시스템 오차 모델과 측정치 모델도 변경되어야 한다. 2.1.1절에서 시각 동기화 오차를 정의한 바와 같이 본 시스템에서의 시각 동기화 오차를 랜덤 상수로 모델링하였기 때문에 시스템 오차 모델은 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$\delta \mathbf{x}' = \mathbf{F}' \delta \mathbf{x}' + \mathbf{w}, \text{ where } \mathbf{F}' = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{15 \times 15} & \mathbf{0}_{15 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 15} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{F}_{15 \times 15}$ 는 상태변수가 확대되기 전인 $\delta \mathbf{x}$ 의 시스템 모델, \mathbf{w} 는 프로세스 잡음이다.

측정치 모델을 얻기 위해서, 시각 동기화 오차가 포함된 위치 오차를 샘플 번호 k 와 함께 식 (7)과 같이 표현하였다.

$$\hat{\mathbf{p}}_k^{EGI} = P(kT_s - \hat{T}_d) + \mathbf{w}_{1,k} \quad (7)$$

$$\text{where } \mathbf{p}_k = P(kT_s) \quad (8)$$

식 (5)를 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 식 (9)가 나온다.

$$\hat{\mathbf{p}}_k^{EGI} = P(kT_s - T_{d,k} - \delta T_{d,k}) + \mathbf{w}_{1,k} \quad (9)$$

1차 테일러 급수를 이용하여 식 (9)를 정리하면 식

(10)과 같이 정리된다.

$$\hat{\mathbf{p}}_k^{EGI} \approx \mathbf{p}_k - \mathbf{v}_k \delta T_{d,k} + \mathbf{w}_{1,k} \quad (10)$$

이와 같은 방법으로 속력 오차와 자세 오차도 식 (11)과 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$\hat{\mathbf{v}}_k^{EGI} \approx \mathbf{v}_k - \frac{\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_{k-1}}{dt} \delta T_{d,k} + \mathbf{w}_{2,k} \quad (11)$$

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_k^{EGI} \approx \boldsymbol{\varphi}_k - \boldsymbol{\omega}_{nb}^n \delta T_{d,k} + \mathbf{w}_{3,k} \quad (12)$$

여기서 dt 는 샘플 간의 시간 간격, $\boldsymbol{\omega}_{nb}^n$ 는 각속도를 의미한다.

식 (10)~(12)를 이용하여 측정치 행렬을 식 (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta \mathbf{z}' = \mathbf{H}' \delta \mathbf{x}' + \boldsymbol{\nu}, \text{ where } \mathbf{H}' = \begin{bmatrix} -\mathbf{v}_k \\ \mathbf{H}_{9 \times 15} - \frac{\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_{k-1}}{dt} \\ -\boldsymbol{\omega}_{nb}^n \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{H}_{9 \times 15}$ 는 상태변수가 확대되기 전인 $\delta \mathbf{x}$ 의 측정치 행렬, $\boldsymbol{\nu}$ 는 측정치 잡음이다.

3.2 시각 동기화 오차 보상 결과

상태변수증강 기법을 적용하여 500초 시나리오에서 시각 동기화 오차를 추정하였고, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 점선은 회전 기동이 일어나는 시점과 회전 기동이 일어나기 직전의 시각 동기화 오차의 추정 오차를 나타내는 것으로 회전 기동으로 인해 시각 동기화 오차가 빠르게 추정되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 회전 기동이 일어난 후 수행되는 SAR 구간에서는 시각 동기화 오차의 영향이 사라졌으리라 기대할 수 있다. Fig. 12와 Fig. 13을 통해 기대한 바와 같이 IRF와 SAR 영상의 평행이동이 더 이상 일어나지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, 해상도와 ISLR 모두 Fig. 14와 Fig. 10을 비교하였을 때 시각 동기화 오차를 추정함으로써 시각 동기화 오차에 의한 영향이 사라진 것을 확인할 수 있다.

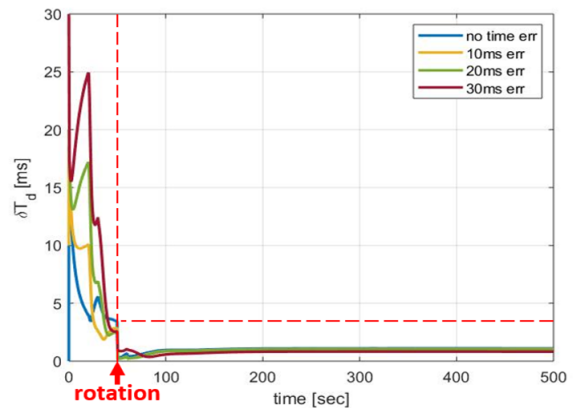


Fig. 11. Estimation error of time synchronization error

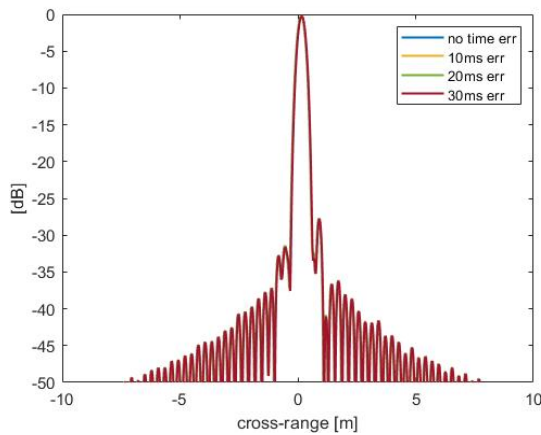


Fig. 12. IRF compensated by state augmentation

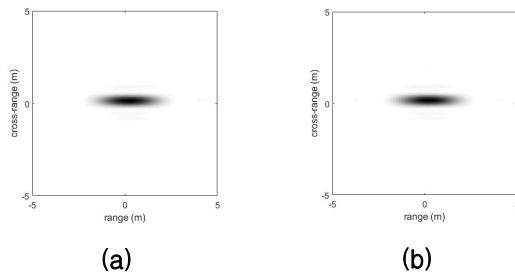


Fig. 13. SAR image compensated by state augmentation (a) no time error (b) 30ms error

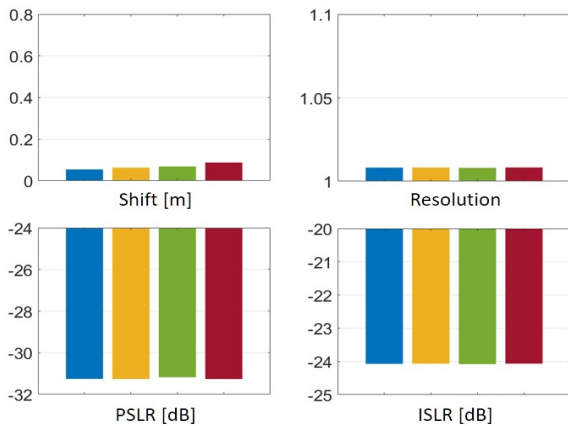


Fig. 14. SAR image quality indices compensated by state augmentation

3.3 기동에 따른 가관측성 분석

앞서 시각 동기화 오차가 회전 기동 직후, 급격히 추정된 것을 미루어보아 상태변수증강 기법이 적용되었을 때, 시각 동기화 오차가 추정되는 정도는 기동에 따라 다르다고 판단하여, 기동에 따른 분석을 진행하였다. Fig. 15와 같이 직선 운동은 시각 동기화 오차 추정을 거의 하지 못하며, 회전 기동 직후, 시각 동기화 오차가 정확하게 추정되어 보상된다.

이와 같은 추정 성능의 차이를 가관측성과 연관 지어 분석을 진행하였다. 추정 성능은 일반적으로 가관측성과 연결되어 있으며[15-18], 가관측성을 분석하는 방법으로는 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 그 중 오차 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 분석 방법을 통해 기동에 따른 가관측성을 분석한다[19]. 시작점에서의 가관측성과 비교하기 위해 오차 공분산 행렬 $P(k)$ 를 식 (14)와 같이 정규화 시킨다.

$$P'(k) = (\sqrt{P(0)})^{-1} P(k) (\sqrt{P(0)})^{-1} \quad (14)$$

따라서, 가관측성의 변화를 정규화된 고유값의 변화로 관찰할 수 있다. Fig. 16은 기동에 따른 시나리오에서 60초 동안 시각 동기화 오차와 연관된 고유값의 RMS(Root Mean Square)를 나타낸다. 고유값이 작을수록, 가관측성이 높고, 가관측성이 높을수록 추정 성능이 좋기 때문에 Fig. 16이 Fig. 15와 같은 경향성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 기동이 발생하면 시각 동기화 오차의 가관측성이 증가하고, 이는 시불변시스템보다 시변시스템의 가관측성이 좋

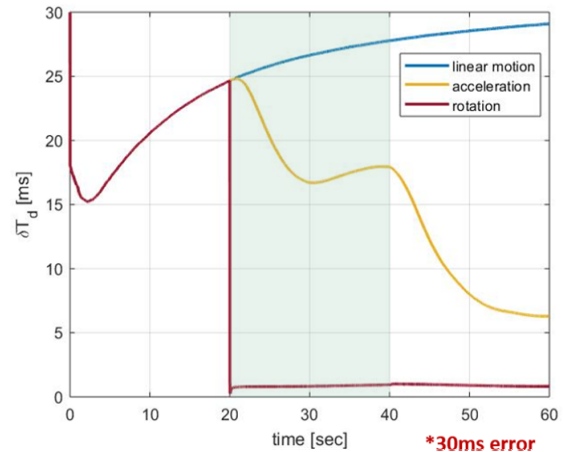


Fig. 15. Estimation error of time synchronization error

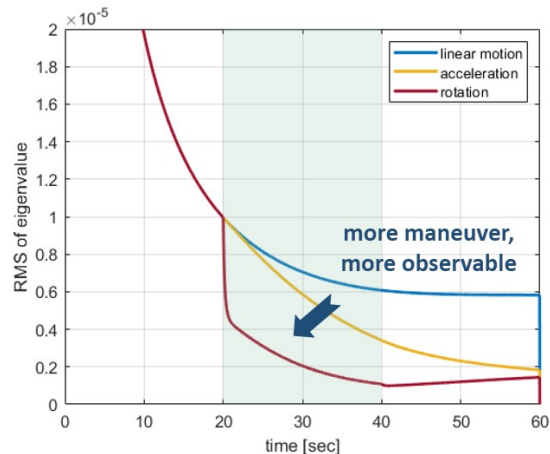


Fig. 16. RMS of eigenvalues associated with time synchronization error

은 것을 의미한다. 특히, 회전 기동은 다른 기동에 비해 가관측성이 가장 높고 가장 빠르다. 따라서, 시각 동기화 오차의 영향을 효과적으로 추정하고 보상하기 위해서는 회전 기동 등 시변하는 기동을 SAR 구간 전에 수행하여야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 SAR 영상 품질 향상을 위해 EGI/IMU 통합 시스템에서 발생하는 시각 동기화 오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 분석하고 이를 상태변수증강 기법을 통해 보상하였다. 시각 동기화 오차를 시각 오프셋으로 모델링한 경우, 시간에 따라 변화하는 성분만이 시각 동기화 오차에 의해 영향을 받아 추가적인 오차가 생성되었다. 그 결과, SAR 구간에서는 항체가 등속직선운동을 하기 때문에 바이어스된 위치 오차가 추가적으로 발생하였고 이는 IRF와 SAR 영상을 평행이동시키며, 전체적인 오차의 크기가 커지면서 해상도와 ISLR도 함께 악화되었다. 이를 보상하기 위해, EKF의 상태변수에 시각 동기화 오차 항을 추가하는 상태변수증강 기법을 적용하고 그 결과 SAR 영상 품질이 저하되지 않는 것을 확인하였다. 또한, 기동에 따라 시각 동기화 오차 추정 성능이 다른 것을 확인하고 가관측성 분석을 통해 회전 기동이 있을 경우 추정 성능이 가장 좋음을 보였다. 따라서, 시각 동기화 오차의 영향을 줄이기 위해서는 SAR 구간 전에 회전 기동 등 시변하는 기동을 수행하여 시각 동기화 오차를 추정하고 보상해주어야 한다.

후 기

이 논문은 2019년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임(U-19-011).

References

- 1) Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P., "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, Vol. 1, No. 1, March 2013, pp. 6~43.
- 2) Carrara, W. G., Goodman, R. S., and Majewski, R. M., *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Norwood, London, 1995.
- 3) Cheney, M., and Borden, B., *Fundamentals of Radar Imaging*, Philadelphia, 2009.
- 4) Haslam, G. E., and Damini, A., "Specifying the Allowable Latencies in the Application of SAR Motion Corrections," in *Proceeding of EUSAR '96, European Conference on Synthetic aperture radar*, Koenigswinter, Germany, March 1996, pp. 26~28.
- 5) Park, Y., Park, Y. B., Jung, J., Shin, H. S., and Park, C. G., "Novel Motion Sensing Algorithm for Improving SAR Imaging by Parametric Error Modeling," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 20, No. 3, September 2019, pp. 761~767.
- 6) Park, W. J., Park, Y., Lee, S., Park, C. G., Song, J., and Bae, C. S., "Motion Sensing Algorithm for SAR Image Using Pre-Parametric Error Modeling," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 47, No. 8, 2019, pp. 566~573.
- 7) Lee, H. K., Lee, J. G., and Jee, G., "Calibration of Measurement Delay in Global Positioning System/Strapdown Inertial Navigation System," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 2, 2002, pp. 240~247.
- 8) Li, J., Jia, L., and Liu, G., "Multisensor Time Synchronization Error Modeling and Compensation Method for Distributed POS," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 65, No. 11, November 2016, pp. 2637~2645.
- 9) Bar-Itzhack, I. Y., and Vitek, Y., "The Enigma of False Bias Detection in a Strapdown System During Transfer Alignment," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 2, 1985, pp. 175~180.
- 10) Ding, W., Wang, J., Li, Y., Mumford, P., and Rizos, C., "Time Synchronization Error and Calibration in Integrated GPS/INS Systems," *ETRI journal*, Vol. 30, No. 1, February 2008, pp. 59~67.
- 11) Li, B., Rizos, C., Lee, H. K., and Lee, H. K., "A GPS-slaved Time Synchronization System for Hybrid Navigation," *GPS solutions*, Vol. 10, No. 3, 2006, pp. 207~217.
- 12) Skog, I., and Handel, P., "Time Synchronization Errors in Loosely Coupled GPS-aided Inertial Navigation Systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 4, December 2011, pp. 1014~1023.
- 13) Ju, H., Cho, S. Y., and Park, C. G., "The Effectiveness of Acceleration Matching According to the Sensor Performance in Shipboard Rapid Transfer Alignment," *The Journal of Navigation*, Vol. 73, No. 1, January 2020, pp. 1~15.
- 14) Joon, L., and Lim, Y. C., "Transfer Alignment Considering Measurement Time Delay and Ship

Body Flexure," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 195~203.

15) Rhee, I., Abdel-Hafez, M. F., and Speyer, J. L., "Observability of an Integrated GPS/INS During Maneuvers," *IEEE Transactions of Aerospace and Electric Systems*, Vol. 40, No. 2, April 2004, pp. 526~535.

16) Goshen-Meskin, D., and Bar-Itzhack, I. Y., "Observability Analysis of Piece-Wise Constant Systems. I. Theory," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 28, No. 4, October 1992, pp. 1056~1067.

17) Goshen-Meskin, D., and Bar-Itzhack, I. Y.,

"Observability Analysis of Piece-Wise Constant Systems. II. Application to Inertial Navigation In-flight Alignment (Military Applications)," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 28, No. 4, October 1992, pp. 1068~1075.

18) Bar-Itzhack, I. Y., and Berman, N., "Control Theoretic Approach to Inertial Navigation Systems," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 11, No. 3, 1988, pp. 237~245.

19) Ham, F. M., and Brown, R. G., "Observability, Eigenvalues, and Kalman Filtering," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 19, No. 2, March 1983, pp. 269~273.