J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(8), 566-573(2019)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.8.566
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

매개변수 사전 오차 모델링 기법을 이용한 SAR 요동측정 알고리즘

박우정[1], 박용곤종[2], 이수정[3], 박찬국[4], 송종화[5], 배창식[6]

Motion Sensing Algorithm for SAR Image Using Pre-Parametric Error Modeling

Woo Jung Park[1], Yong-gonjong Park[2], Soojeong Lee[3], Chan Gook Park[4],
Jong-Hwa Song[5] and Chang Sik Bae[6]
Department of Mechanical and Aerospace Engineering/Automation and System Research Institute, Seoul National University[1,2,3,4]
Avionics Radar Team, Hanwha Systems[5,6]

ABSTRACT

In order to obtain high-quality images by motion compensation in the airborne synthetic aperture radar (SAR), accurate motion sensing in image acquisition section is necessary. Especially, reducing relative position error and discontinuity in motion sensing is important. To overcome the problem, we propose a pre-parametric error modeling (P-PEM) algorithm which is a real-time motion sensing algorithm for the airborne SAR in this paper. P-PEM is an extended version of parametric error modeling (PEM) method which is a motion sensing algorithm to mitigate the errors in the previous work. PEM estimates polynomial coefficients of INS error which can be assumed as a polynomial in the short term. Otherwise, P-PEM estimates polynomial coefficients in advance and uses at image acquisition section. Simulation results show that the P-PEM reduces relative position error and discontinuity effectively in real-time.

초 록

항공 SAR에서 고품질의 영상을 얻기 위해서는 영상 획득 구간에서 항공기의 요동을 정확히 측정하여야 한다. 특히 요동측정을 할 때 상대적 위치오차 및 불연속성 오차를 줄여야 한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 합성 개구 레이더(SAR)에서 실시간으로 요동측정을 하는 매개변수 사전 오차 모델링 방법(P-PEM, Pre-Parametric Error Modeling)을 제안한다. P-PEM은 기존에 본 연구진에서 제안한 항법오차를 다항식으로 모델링하여 추정하는 매개변수 오차 모델링 기법(PEM, Parametric Error Modeling)에서 확장된 기법이다. PEM은 IMU에 의한 INS 오차를 짧은 시간 동안 다항식이라 가정하여 모델링하는 요동측정기법이다. 반면, P-PEM은 다항식 오차 모델의 계수를 미리 추정하고 영상촬영단계에서 사용한다. 시뮬레이션 결과, P-PEM을 적용하면 실시간으로 불연속성 오차를 제거한 요동측정이 가능함을 확인하였다.

Key Words : Synthetic Aperture Radar(합성 개구면 레이더), Motion Sensing(요동측정), Parametric Error Modeling(매개변수 오차 모델링)

† Received : May 23, 2019 Revised : July 18, 2019 Accepted : July 27, 2019
[1] Graduate Student, [2] Graduate Student, [3] Graduate Student, [4] Professor, [5] Researcher, [6] Researcher
[4] Corresponding author, E-mail : chanpark@snu.ac.kr, ORCID 0000-0002-7403-951X
© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Ⅰ. 서 론

합성 개구 레이더(SAR, Synthetic Aperture Radar)는 고정된 지점에서 신호를 송수신하는 다른 레이더 시스템과 달리 움직이는 동안 신호를 수집하여 이미지를 촬영하는 레이더 시스템이다. 합성 개구 레이더는 여러 위치에서 얻은 신호들의 위상을 일치하도록 합성하여 영상을 생성하기 때문에, 같은 크기의 안테나를 사용한 레이더 시스템에 비해 더 높은 해상도의 영상을 얻을 수 있다[1]. Fig. 1은 spotlight SAR로 표적을 촬영할 때 항공기의 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 1을 보면 항공기가 SAT(Synthetic Aperture Time)동안 이상적으로는 직선궤적인 nominal trajectory를 등속으로 움직이며 center of target area 주변의 신호를 수집하여 SAR 영상을 생성해야 한다. 그러나 항공기가 대기의 외란 및 제어에서 발생하는 오차 등으로 인해 실제로는 등속직선운동을 하지 못하고 actual trajectory를 따라 이동한다[1-3]. 그리고 센서에서는 오차에 의해 measured trajectory의 위치를 측정하게 된다. 센서오차에 의해 생긴 measured trajectory와 nominal trajectory의 차이를 보상하지 않으면 영상의 품질이 저하되므로, 고해상도의 영상을 획득하기 위해서는 항공기의 실제 비행 궤적 상의 요동을 추정하고 이를 보정하는 요동보상(MOCO, Motion Compensation)이 필요하다[4-7]. 요동보상의 경우 펄스 반복 주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency) 동적 제어 등으로 수행될 수 있으나, 센서오차 등에 의해 남는 잔여오차들은 요동보상으로도 해결이 되지 않아 요동측정(Motion Sensing) 단계에서 해결하여야 한다[8-10].

항공용 SAR의 요동측정은 일반적으로 INS 또는 EGI(Embedded GPS/INS)를 기반으로 하는데, 이러한 항법장치에서 제공하는 항법해의 정확도가 영상 품질에 큰 영향을 미친다[11-13]. 기존의 항법시스템은 항체의 절대적인 위치 정확도가 중요한 성능 지표인 것에 반해, 요동측정용 항법장치는 영상 획득 구간에서의 상대적 위치오차 및 불연속성 오차를 중요한 성능 지표로 요구한다[14,15]. 위치오차는 시간에 따른 오차를 다항식으로 모델링한 관점에서 보면 상수항 오차, 1차항 오차, 고차항 오차 등으로 나눌 수 있는데, 2차 이상의 고차항 오차들은 영상의 해상도를 떨어뜨린다[8-10]. 특히, 불연속성 오차는 차수가 무한한 형태의 오차이므로 SAR 영상 해상도를 매우 떨어뜨린다[9,10,12]. 불연속성 오차는 GPS를 이용하여 항법오차를 보정하는 경우 발생하며, GPS로 위치보정을 하면 절대적인 위치오차는 작지만 불연속성 오차를 포함하고 있으므로 그대로 사용할 경우 요동측정장치의 요구 성능을 만족시키지 못한다[15].

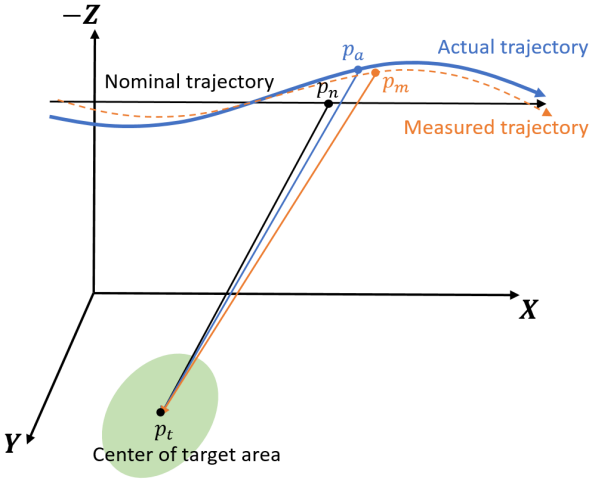


Fig. 1. Synthetic Aperture Radar Geometry

이전 연구에서는 불연속성 문제를 해결하기 위해 요동측정 알고리즘들이 연구되었다. 스무딩(smoothing)을 기반으로 한 연구로는 상대위치오차를 감소시키기 위해 후처리로 칼만스무더를 적용한 연구가 있다[15]. 또한 확장칼만필터(EKF, Extended Kalman Filter)와 고도댐핑루프를 이용한 실시간 스무딩 기법도 연구되었다[12]. 스무딩과 다른 접근법으로 불연속성 오차를 제거하기 위해, 관성항법 해의 오차를 다항식으로 모델링하여 이를 보정하는 기법인 매개변수 오차 모델링(PEM, Parametric Error Modeling)이 제안되었다[16]. 시간이 짧은 경우의 INS에 의해 발생한 위치오차(short-term error of INS position error)는 다항식 형태로 모델링이 된다[17]. EGI 위치를 기준(reference)으로 하여 INS의 위치오차를 계산하고 PEM을 적용하면 위치오차의 다항식 계수들을 추정할 수 있고, 이렇게 구한 다항식으로 근사한 위치오차는 불연속성 오차를 효과적으로 제거한다. 이 방법은 요동측정에서 새로운 접근법이나, 후처리 기반의 방법이라는 단점이 있다.

본 연구에서는 실시간으로 효과적인 요동측정을 하기 위해 PEM의 다항식 계수를 SAT 구간 전에 계산하여 실시간으로 위치오차를 계산하여 보정하는 매개변수 사전 오차 모델링(P-PEM, Pre-Parametric Error Modeling)을 제안한다. P-PEM은 INS에 의해 발생하는 위치오차의 다항식 계수를 SAR 촬영 시작 전의 데이터로부터 미리 계산한다. 그 다음 SAR 촬영 구간 동안 앞에 구한 다항식 모델로부터 위치오차를 추정하여 불연속성 오차를 제거할 수 있다. PEM과 P-PEM 둘 다 최소자승법 기반의 알고리즘이므로 연산량 자체는 매우 적다. 그러나 PEM은 SAR 촬영이 끝난 뒤에 보상이 가능한 반면, P-PEM은 실시간 요동측정을 통해 영상합성을 하는 과정 중에 보상하므로 영상합성에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 전투상황에 사용되는 군용 SAR 시스템과 같이 빠른 작전 수행이 요구되는 경우에는 사용자가 원하는 지형의 영상을 최대한 빠르게 보여주는 것이 중요하므로, 실시간 요동측정을 통해 영상합성 시간을 줄이는 것이 유의미하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 본 연구팀에서 기존에 선행하였던 PEM 알고리즘 및 본 논문에서 PEM 알고리즘을 확장하여 만든 P-PEM에 대한 설명을 한다. Ⅲ장에서 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 요동측정 성능을 검증한다.

Ⅱ. 시스템 구성 및 관성항법 오차모델링

INS와 GPS를 결합한 정보를 제공하는 EGI는 정확한 항법해를 제공한다는 장점이 있다. EGI를 확장칼만 필터 기반의 INS/GPS 약결합 구조(INS/GPS loosely-coupled integration)로 Fig. 2와 같이 구성하면 상태변수는 식 (1)과 같다[16].

$$x = \left[\delta p^T \ \delta v^T \ \delta \varphi^T \ \delta b_a^T \ \delta b_g^T\right] \tag{1}$$

여기서 $\delta p, \delta v, \delta \varphi$는 각각 위치오차, 속도오차, 자세오차를 의미하며, δb_a, δb_g는 가속도계 바이어스 오차, 자이로 바이어스 오차를 의미한다.

INS/GPS 약결합으로 EGI를 구성하여 GPS 위치를 INS에 결합하면 측정치 모델을 식 (2)와 같이 쓸 수 있다[16].

$$z = Hx = [I_{3\times 3} \ \ 0_{3\times 12}]x \tag{2}$$

이렇게 위치 측정치를 바로 결합하게 되면 항법오차는 줄일 수 있으나 위치오차의 불연속성이 발생하게 되고 SAR 영상품질을 감소시킨다. 위치오차의 불연속성은 PEM 기법을 통해 감소시킬 수 있음을 이전 연구에서 확인하였다[16]. PEM 기법은 등속직선 운동을 할 때 INS에 의해 발생한 위치오차를 Table 1을 이용하여 다항식으로 모델링하는 것이다. Table 1은 항법오차에 영향을 미치는 요소들을 각 항별로 나누어 정리한 것이다[17]. 초기위치오차 δp_0는 상수항, 초기속도오차 δv_0는 1차항, 가속도계 바이어스 δb_a와 초기 tilt 자세오차 $\delta\beta$는 2차항, 자이로 바이어스 오차 δb_g와 초기방위각오차 $\delta\gamma$ 는 3차항으로 모델링되며, 4차항 이상으로 모델링되는 값은 짧은 시간에서는 너무 작기 때문에 무시한다. 따라서 INS에 의한 위치오차는 식 (3)과 같이 3차 다항식으로 모델링할 수 있다.

$$e_{\in S}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \tag{3}$$

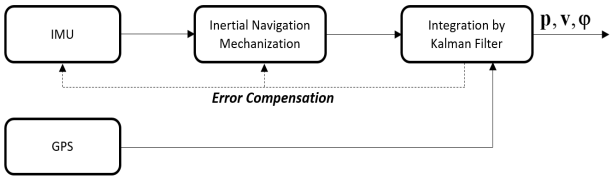


Fig. 2. Block diagram of EGI system

Table 1. Short term position errors of INS

Error source	Position error
Initial position error	δp_0
Initial velocity error	$\delta v_0 t$
acceleration bias	$\frac{1}{2}\delta b_a t^2$
Initial tilt error	$\frac{1}{2} g\delta\beta t^2$
gyro drift	$\frac{1}{6} g\delta b_g t^3$
Initial azimuth error	$\frac{1}{6} g\Omega_N \delta\gamma t^3$

그러나 실제 상황에서 정확한 위치를 알 수 없으므로, EGI 데이터를 기준으로 하여 INS 오차를 계산하여 3차 다항식으로 모델링한다. EGI 위치에 의한 불연속성을 없애는 PEM의 전체 과정은 2.1에서 다룬다.

2.1 매개변수 오차 모델링(PEM)

PEM의 구조도는 Fig. 3과 같으며, 다음과 같은 방법으로 보상을 진행한다.

1. SAT 시간 동안 INS 예측오차 $\tilde{e}_{INS}(t)$를 EGI를 기준으로 하여 계산한다.

$$\tilde{e}_{INS}(t) = p_{\in S}(t) - p_{EGI}(t) \tag{4}$$

2. 1에서 구한 INS 예측오차를 이용하여 3차 다항식으로 모델링된 오차 의 계수를 계산한다. 이는 식 (6), (7)과 같이 최소자승법(least square)을 이용한다.

$$\hat{e}_{INS}(t) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 t + \hat{a}_2 t^2 + \hat{a}_3 t^3 \tag{5}$$

$$\hat{a} = \left[\hat{a}_0 \ \ \hat{a}_1 \ \ \hat{a}_2 \ \ \hat{a}_3\right]^T \approx (A^T A)^{-1} A^T \tilde{e}_{INS} \tag{6}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & t_N^2 & t_N^3 \end{bmatrix} \tag{7}$$

3. 2에서 구한 계수로부터 $\hat{e}_{INS}(t)$를 계산한다.

$$\hat{e}_{INS} = A\hat{a} \tag{8}$$

4. 3에서 구한 다항식 모델링된 오차 $\hat{e}_{INS}(t)$를 INS 위치에서 보상해준다.

$$\hat{p}_{INS}(t) = p_{INS}(t) - \hat{e}_{INS}(t) \tag{9}$$

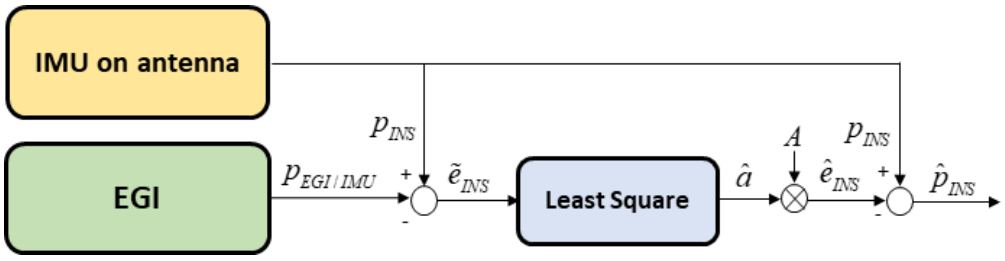


Fig. 3. Block diagram of motion sensing algorithm using PEM

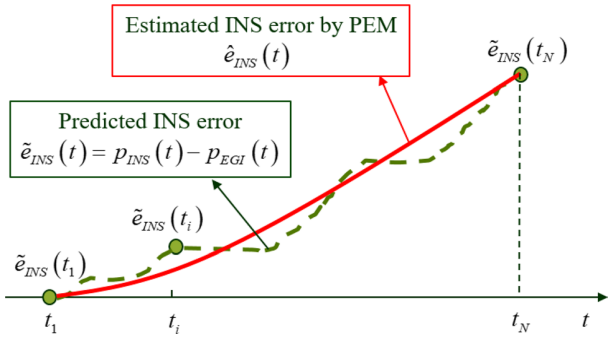


Fig. 4. Predicted and estimated INS errors

Figure 4는 이를 그림으로 나타낸 것이며, PEM으로 근사한 위치오차는 EGI 위치의 불연속성을 효과적으로 제거한다.

2.2 매개변수 사전 오차 모델링(P-PEM)

앞서 살펴본 PEM은 EGI 위치오차의 불연속성을 효과적으로 감소시킬 수 있으나, SAT 동안 항법오차를 계산한 다음 후처리로 계산해야 한다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 매개변수 사전 오차 모델링(P-PEM)을 제안한다. PEM은 SAT 구간 동안 얻은 INS 오차를 이용하여 3차 다항식 모델링을 진행하였다. 만약 INS 오차를 모델링한 3차 다항식의 계수를 SAT 전의 INS 오차 데이터를 이용해 미리 계산한다면, 이렇게 추정한 계수를 이용하여 SAT 구간에서의 $\hat{e}_{INS}(t)$ 를 실시간으로 계산할 수 있다. Fig. 5는 P-PEM의 구조도를 나타낸 것이고, Fig. 6은 다항식 모델링을 그림으로 나타낸 것이다. 전체 과정은 다음과 같다.

1. SAT 구간 이전에 t_{pre} 구간 동안의 데이터로 PEM의 계수 추정 방법을 사용하여 계수 $\hat{a}$ 을 구한다.

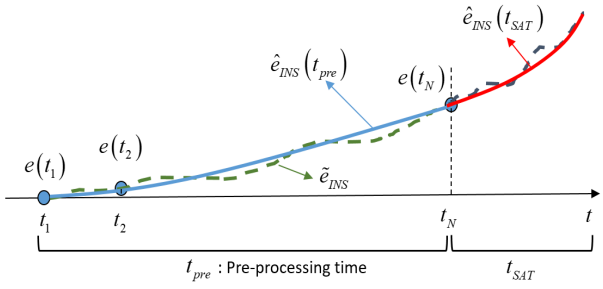


Fig. 6. Predicted and estimated INS errors in P-PEM

2. 1에서 구한 계수를 이용하여 SAT 구간의 $\hat{e}_{INS}(t)$ 를 계산한다.

$$\hat{e}_{INS} = A'\hat{a} \tag{10}$$

$$A' = \begin{bmatrix} 1 & t_{N+1} & t_{N+1}^2 & t_{N+1}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_M & t_M^2 & t_M^3 \end{bmatrix} \tag{11}$$

3. PEM과 마찬가지로 $\hat{e}_{INS}(t)$ 를 INS 위치에서 보상해준다.

III. 시뮬레이션

P-PEM을 이용하여 위치오차 불연속성을 제거하는 과정을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 본 논문에서는 spotlight 모드에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션에 사용한 전술급 IMU의 성능 및

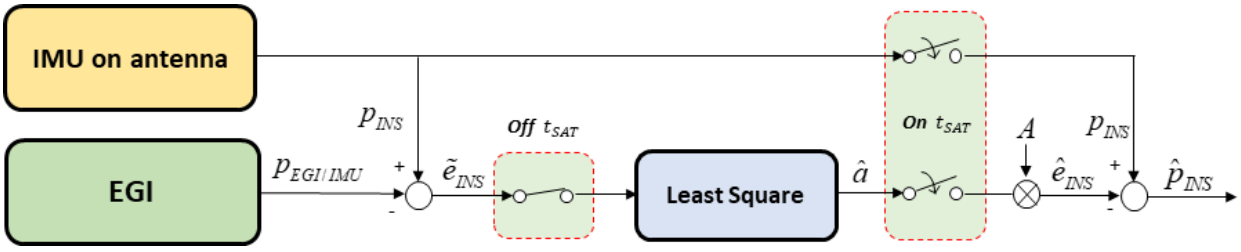


Fig. 5. Block diagram of motion sensing algorithm using P-PEM

Table 2. Sensor Specification

Sensor	Parameters	values(1σ)
Accelerometer	Bias repeatability	1 mg
	Velocity random walk	0.1 mg/$\sqrt{Hz}$
Gyroscope	Bias repeatability	1 deg/hr
	Angular random walk	0.01 deg/$\sqrt{hr}$
GPS	Position accuracy	1 m

Table 3. Basic parameters fo the SAR image

Parameters	values
PRF	1,000 Hz
SAT	10 s
Frequency band	X-band
Range distance of the target area	45 km
Size of the target area	300 x 300 m^2
Bandwidth	150 MHz

spotlight SAR 영상처리에 관한 변수들은 각각 Tables 2, 3에 정리되어있으며, EGI는 항법급 IMU에 INS/GPS 약결합으로 구성하였다. 항체가 250m/s로 500초 동안 등속직선운동을 하고 SAT는 마지막 490~500초에 10초 동안 수행되었다.

3.2 시뮬레이션 결과

Figure 7은 P-PEM을 통해 다항식의 계수를 SAT 전에 추정한 다음, SAT 구간에서 다항식 계수를 이용하여 오차를 추정하는 것을 나타낸 것이다. 0~100초 구간에서 파란색 실선이 $\tilde{e}_{INS}(t)$를 나타낸 것이고, 파란색 별표선이 $\tilde{e}_{INS}(t)$로부터 다항식 모델링을 한 $\hat{e}_{INS}(t)$를 그린 것이다. SAT 구간에서 $\tilde{e}_{INS}(t)$는 빨간색 실선인데, 앞에서 구한 3차 다항식(파란색 별표선)을 SAT 구간까지 확장하면 빨간색 별표로 나오며, 이는 SAT 구간에서도 $\tilde{e}_{INS}(t)$와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Figure 8은 Fig. 7에서 다루었던 항법 위치오차 $\triangle p$와 SAR 영상을 획득하기 위해 필요한 표적과의 거리오차 $\triangle R$의 관계를 spotlight SAR 모드에 대해 나타낸 것이다. 이는 항공기의 위치에 따라 기하학적

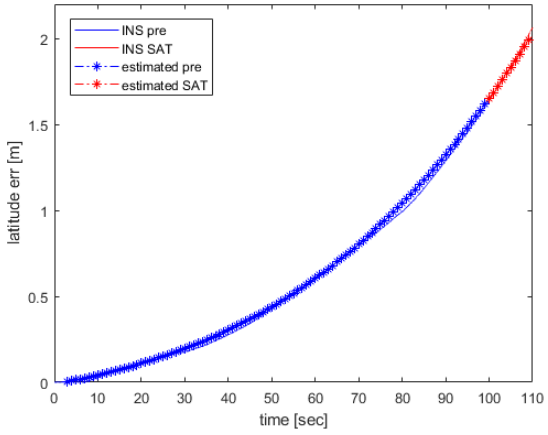


Fig. 7. Estimation of INS error using P-PEM

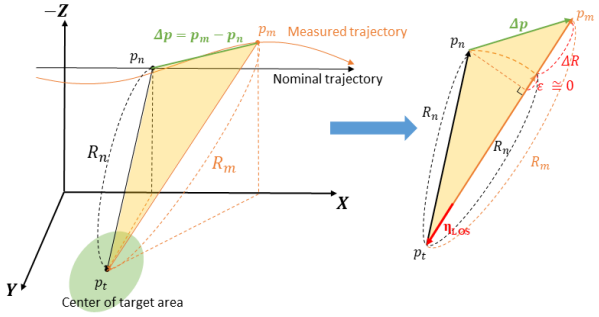


Fig. 8. Relationship between position error and range error in spotlight SAR mode

으로 계산하여 구할 수 있다.

$$R_m = R_n + \triangle R \tag{12}$$

$$\Delta R = \mathbf{\Delta p} \cdot \mathbf{\eta}_{\mathrm{LOS}} - \varkappa \approx \mathbf{\Delta p} \cdot \mathbf{\eta}_{\mathrm{LOS}} \tag{13}$$

여기서 η_{LOS}는 표적에서 항체를 바라보는 LOS (Line of Sight)단위벡터이다. $\triangle p$가 R_n에 비해 매우 작기 때문에 식 (13)에서와 같이 $\varepsilon \cong 0$으로 가정할 수 있다. 예를 들어 거리 R_n=45km, 항법오차 $|\triangle p|$ =50cm일 때 ε를 계산해보면 항법오차의 방향에 따라 최소 0에서 최대 2.78μm로 매우 작은 값으로 나온다. 즉, 식 (13)과 같이 spotlight SAR 모드에서 거리오차는 항법오차와 LOS 단위벡터의 내적으로 표현이 가능하다.

Figure 9는 INS, PEM과 t_{pre}에 따른 P-PEM의 거리오차에서 SAR 영상품질에 영향이 없는 상수항, 1차항을 제외한 거리오차(보상된 거리오차)를 그린 그래프이다. 보상된 거리오차는 몬테-카를로 시뮬레이션을 50번 수행하고 RMS(Root Mean Square)을 그린 것으로, 값이 작을수록 고품질의 SAR 영상을 얻을 수 있다. 그래프를 보면 P-PEM의 보상된 거리오차가 INS보다는 작고 PEM보다는 큼을 확인할 수 있

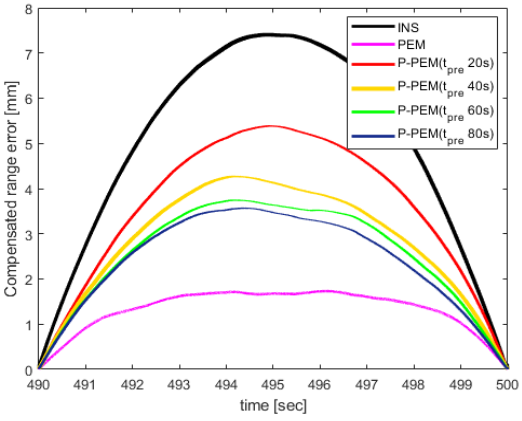


Fig. 9. Compensated range error

다. P-PEM에서 t_{pre}가 길어질수록 최소자승법에 사용할 INS 오차의 표본이 많아져 3차 다항식 모델링이 정확해지고 성능이 향상된다. 그러나 t_{pre}가 너무 길어지면 오히려 P-PEM의 요동측정 성능이 저하될 수 있다. 시간이 너무 길어지면 Table 1의 INS 오차 모델링 가정이 성립하지 않으며, t_{pre}가 80초를 넘어가면 2차 이상의 거리오차가 오히려 더 커짐을 확인하였다.

Figure 10은 위에서 얻은 거리오차를 이용하여 spotlight SAR에서 azimuth 방향으로 Impulse Response Function(IRF)를 그린 것이다. 각각의 IRF를 검은색 true 그래프와 비교하였는데, Fig. 10(a)를 보면 EGI는 불연속성 오차에 의해 IRF가 많이 메인로브(main lobe)와 사이드로브(side lobe)를 구분하기가 힘들 정도로 왜곡되었다. Fig. 10(b)의 INS 결과는 EGI 결과보다는 좋으나 peak intensity loss가 많이

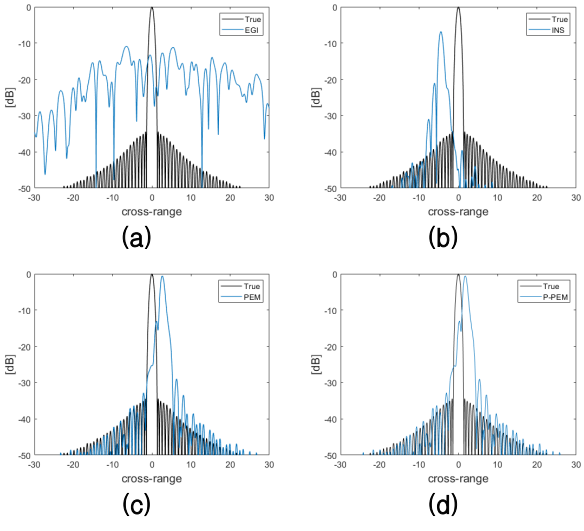


Fig. 10. IRF in azimuth direction compared with true IRF (a) EGI (b) INS (c) PEM (d) P-PEM

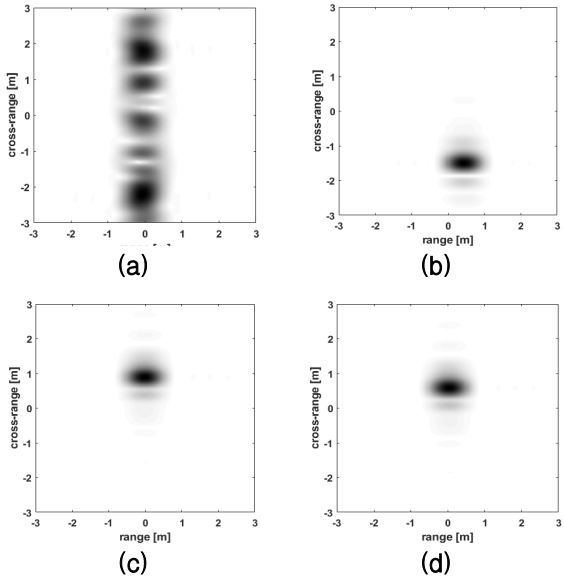


Fig. 11. Spotlight SAR image (a) EGI (b) INS (c) PEM (d) P-PEM

발생함을 확인할 수 있다. Fig. 10(c), 10(d)를 보면 10(b)에 비해 IRF가 true와 많이 유사해졌음을 확인할 수 있고, peak intensity와 ISLR (Integrated Side Lobe Ratio)이 개선되었다.

Figure 11은 요동측정한 결과를 이용하여 Spotlight SAR 영상을 획득한 것이다. Fig. 11(a)를 보면 EGI 결과로는 표적을 찾을 수 없을 정도로 잔상이 많이 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 11(b)의 INS 결과는 표적이 중심에 있지 않고 아래쪽에 위치하긴 하나 EGI와 같은 잔상은 많이 생성되지 않는다. Fig. 11(c)와 (d)는 11(b)보다 표적이 더 가운데 위치함을 확인할 수 있다.

그러나 P-PEM의 기반이 되는 Table 1은 항공기가 등속직선운동을 할 때만 성립한다. 만약 항공기가 가속이나 회전 기동을 하게 되면 이 가정은 성립하지 않게 된다. Fig. 12는 INS의 short term error 블록다이어그램에 가속이 고려되는 경우를 그린 것이다 [17]. Fig. 12를 풀어 항법오차를 계산하고 2차항만 보게 되면 식 (14)와 같다.

$$\Delta p_N \approx \frac{1}{2} t^2 \sqrt{(g\varphi_{E_0})^2 + \nabla_N{}^2 + f_E{}^2} \tag{14}$$

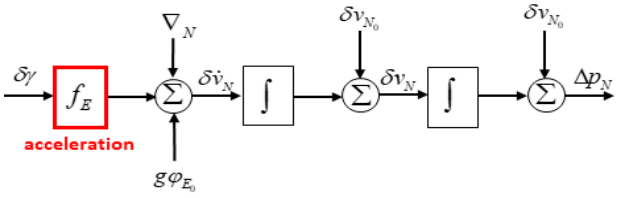
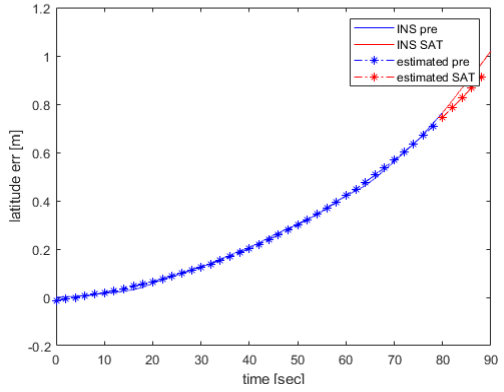
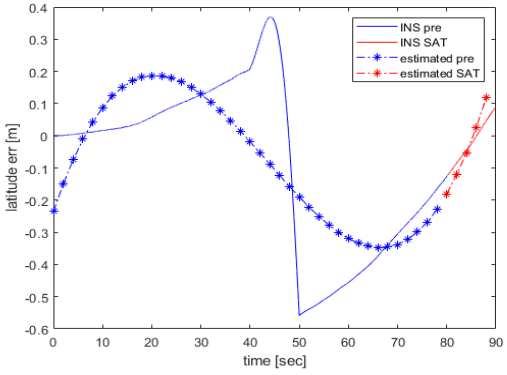


Fig. 12. Block diagram of the single channel INS error in short term



(a)



(b)

Fig. 13. Navigation error estimation by P-PEM (a) w/o maneuver before SAT (b) w/ maneuver before SAT

식 (14)에서 f_E가 제곱근 안에 들어가서 이차항의 계수에 영향을 미침을 알 수 있다. P-PEM에서 t_{pre}가 시작될 때의 초기 자세오차 ϕ_{E_0}, 바이어스오차 ∇_N는 일정한 값이기 때문에 다항식으로 모델링이 가능하다고 했었는데, 기동이 있으면 f_E가 시간에 따라 변하므로 다항식 모델링이 불가능해진다.

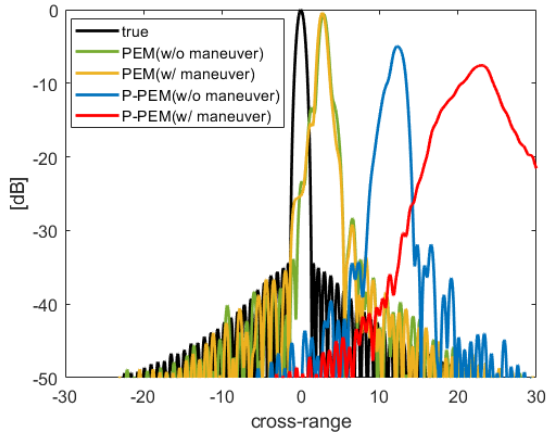


Fig. 14. Effect of maneuver on PEM and P-PEM

이를 검증하기 위해 t_{pre}동안 항체의 기동유무에 따라 P-PEM으로 항법오차 추정이 가능한지 확인하였다. Fig. 13(a)는 t_{pre}동안 기동이 없을 때 P-PEM으로 항법오차 모델링이 가능함을 보여주고, Fig. 13(b)는 기동이 있으면 다항식 모델링이 불가능함을 보여준다. 또한 Fig. 14에서 PEM은 기동의 유무에 상관없이 IRF가 비슷하게 나오고, P-PEM은 기동이 있을 때 IRF의 resolution broadening 및 peak intensity loss가 발생함을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 항공용 SAR 영상품질을 향상시키기 위해 P-PEM 기법을 통해 실시간으로 불연속성 오차를 줄이는 요동측정 알고리즘을 제안하였다. SAR 영상 촬영 전에 INS 오차를 다항식으로 모델링하여 계수를 구한 다음, SAR 촬영구간에서 이 계수를 이용하여 실시간으로 INS 오차를 추정하고 보상하여 불연속성 오차를 제거한다. 시뮬레이션 결과, P-PEM을 통해 불연속성 오차를 제거하여 INS에 비해 IRF 및 SAR 영상품질이 개선됨을 확인하였다. 추후에는 t_{pre} 동안 항체에 기동이 있는 경우에도 P-PEM 기법을 사용할 수 있도록 연구할 것이다.

후 기

본 연구는 한화시스템(주)으로부터 지원(과제번호 U-18-016)을 받아 수행되었습니다.

References

1) Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P., “A Tutorial on Synthetic Aperture Radar,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 1, No. 1, 2013, pp. 6~43.

2) Cheney, M., and Borden, B., “Fundamentals of Radar Imaging,” *Philadelphia, USA: Siam*, 2009.

3) Moreira, A., and Huang, Y., “Chirp Scaling Algorithm for Processing SAR Data with High Squint Angle and Motion Error,” *SAR Data Processing for Remote Sensing*, Vol. 2316, 1994, pp. 268~278.

4) Haslam, G. E., and Damini, A., “Specifying the Allowable Latencies in the Application of SAR Motion Corrections,” *Proceedings of EUSAR ’96, European Conference on Synthetic aperture radar*, 1996, pp. 26~28.

5) Kim, T. J., "Motion Measurement for High-accuracy Real-time Airborne SAR," *Radar Sensor Technology VIII and Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VII*, 2004, pp. 36~45.

6) Doerry, A. W., "Motion Measurement for Synthetic Aperture Radar," *Sandia National Laboratories Report SAND2015-20818*, 2015.

7) Kim, T. J., Fellerhoff, J. R., and Kohler S. M., "An Integrated Navigation System Using GPS Carrier Phase for Real-Time Airborne/Synthetic Aperture Radar (SAR)," *Navigation*, Vol. 48, No. 1, 2001, pp. 13~24.

8) Kusk, A., Dall, J., and Christensen, E. L., "Estimating Sensor Motion in Airborne SAR(Ph.D. dissertation)," *Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark*, 2006.

9) Mao, Y., Xiang, M., Wei, L., and Han, S., "The Effect of IMU Inaccuracies on Airborne SAR imaging," *Journal of Electronics (China)*, Vol. 28, 2011, pp. 409~418.

10) Buckreuss, S., "Motion Errors in an Airborne Synthetic Aperture Radar System," *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 2, No. 6, 1991, pp. 655~664.

11) Fang, J., and Gong, X., "Predictive Iterated Kalman Filter for INS/GPS Integration and Its Application to SAR Motion Compensation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 59, No. 4, 2010, pp. 909~915.

12) Song, J. W., and Park, C. G., "INS/GPS Integrated Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Motion Compensation Using an Extended Kalman Filter with a Position Damping Loop," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 18, No. 1, 2017, pp. 118~128.

13) Xing, M., Jiang, X., Wu, R., Zhou, F., and Bao, Z., "Motion Compensation for UAV SAR Based on Raw Radar Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 8, 2009, pp. 2870~2883.

14) Zhang, L., Wang, G., Qiao, Z., and Wang, H., "Azimuth Motion Compensation with Improved Subaperture Algorithm for Airborne SAR Imaging," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 10, No. 1, 2016, pp. 184~193.

15) Park, Y., and Park, C. G., "Kalman Smoother Based Mitigation Method of Relative Position Error for Precision Improvement of Aviation SAR," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, 2016, pp. 558~559.

16) 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*, 2019, pp. 1~7.

17) Titterton, D. H., and Weston, J. L., "Strap-down Inertial Navigation Technology(2nd edition)," *The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, UK*, 2004.