

# SAR(Synthetic Aperture Radar) 요동보상을 위한 위치 추정 기법

이해민\*<sup>1</sup>, 정창식\*<sup>2</sup>, 김기완\*<sup>3</sup>

## A Position Estimation Technique for Motion Compensation of Synthetic Aperture Radar

Haemin Lee\*<sup>1</sup>, Chang-Sik Jung\*<sup>2</sup>, and Ki-Wan Kim\*<sup>3</sup>

### 요 약

플랫폼 요동에 의한 위상오차가 있을 경우 SAR 요동보상을 위해 복합항법장치(EGI)출력 등의 항법데이터가 필수적이다. 그러나 EGI 위치데이터는 일반적으로 GPS 보정에 의한 주기적인 불연속성이 발생하므로 SAR 요동보상에 적합하지 않아 위치 추정을 위한 별도의 데이터 처리가 필요하다. 본 논문에서는 SAR 요동보상을 위한 추적필터 기반의 위치 추정 기법을 제안한다. 제안한 기법은 기존에 사용되던 속도적분 기반의 위치 추정 기법과 달리 편향오차에 의한 선형위치오차가 발생하지 않아 SAR영상 위치 왜곡을 방지할 수 있다. 또한 매개변수 조정을 통해 SAR 영상의 위치정확도, PSLR 및 ISLR 성능을 최적화 할 수 있다. 비행시험데이터를 통해 제안된 기법을 기존의 속도적분 기법과 비교하였고, 제안된 기법을 요동보상에 사용한 경우에 영상 위치 오차가 제거되는 물론 매개변수 조정을 통해 PSLR 및 ISLR 성능도 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

Navigation data such as the output of embedded GPS/INS (EGI) is essential for synthetic aperture radar (SAR) motion compensation because of the phase error caused by the platform motions. However, EGI position data is inappropriate to motion compensation since it commonly contains periodic discontinuities due to the GPS measurement update. Therefore, this paper suggests a position estimation technique of navigation data based on tracking filter for SAR motion compensation. The proposed method solves the linear position error which the conventional velocity integration method produces, thus there is no distortion of SAR position. Furthermore, the tuning of the parameters in the method can optimize the position error, peak side-lobe ratio (PSLR) and integrated side-lobe ratio (ISLR) of the SAR image. The comparison of the SAR performance between the proposed and conventional position estimation method is performed through the flight test data. The result shows that SAR position error is removed and the PSLR and ISLR also decreased by parameter tuning when using the proposed method.

### Keywords

synthetic aperture radar, motion compensation, motion measurement, Kalman filter

\* 국방과학연구소 연구원 (\*<sup>1</sup> 교신저자)

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-4235-6251>

- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-9597-1218>

- ORCID<sup>3</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-7918-8098>

· Received: Jan. 22, 2020, Revised: Mar. 16, 2020, Accepted: Mar. 19, 2020

· Corresponding Author: Haemin Lee

Agency for Defense Development, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, 34186, Korea

Tel.: +82-42-821-4412, Email: hmlee@add.re.kr

## 1. 서 론

레이다는 일반적으로 거리압축기법을 통해 펄스 폭에 비해 높은 거리방향 해상도를 얻을 수 있으나, 안테나의 물리적 크기의 제한으로 인해 방위방향 해상도는 상대적으로 매우 낮고, 이는 표적의 거리가 멀어질수록 더욱 악화되는 문제가 있다. 이 문제를 해결하는 방안으로 도입된 개념이 SAR(Synthetic Aperture Radar)이다[1]-[3].

SAR는 항공기와 같이 움직이는 플랫폼에 탑재되어 과형을 순차적으로 송수신하고, 이렇게 여러 위치에서 측정된 신호의 합성을 통해 높은 거리 및 방위해상도의 영상을 생성하는 기법이다. 이 과정에서 플랫폼이 신호의 합성을 위한 이상적인 움직임을 보이지 않을 경우 수신 신호의 위상을 보상하기 위한 과정이 필요하고, 이를 일반적으로 요동보상이라 한다[4][5].

요동보상을 위해서는 레이다의 요동측정이 필요하고, 이를 위해 GPS(Global Positioning System), IMU(Inertial Measurement Unit)와 같은 항법 센서 및 항법알고리즘이 필요하다. 일반적으로 IMU가 가지는 가속도와 각속도의 편향오차를 보정하기 위해 GPS의 측정치를 칼만필터로 보정하는 방식이 널리 쓰이고, 이렇게 IMU와 GPS가 결합된 시스템을 통틀어 복합항법장치(EGI, Embedded GPS and IMU)라 한다. 그러나 EGI 또한 IMU와 GPS가 가지는 오차로 인해 잔여오차가 존재하며, 특히 GPS 보정으로 인한 위치 출력의 불연속성은 SAR 요동보상에 직접 사용할 경우 영상에 치명적인 성능 악화를 가져온다[6][7]. 따라서 일반적인 항법과 다른 별도의 위치추정기법을 통한 SAR 요동보상이 필요하다.

항법 잔여오차를 추가로 보상하기 위한 알고리즘으로 SAR raw data를 이용한 PGA(Phase Gradient Autofocus)[8]가 널리 쓰이고 있으나, 제한된 window size로 인하여 불연속성에 의한 고주파의 잔여오차는 제거가 불가능하다[9][10]. 레이다의 raw data를 항법시스템과 결합하여 잔여 오차를 제거하는 방법도 제시되었으나[11][12], 실시간 요동보상을 요구하는 SAR 시스템에 대해서는 적용하기 어렵다.

GPS에 의한 불연속성을 제거하기 위해, SAR 입

무구간에서 순수 INS(Inertial Navigation System)만을 활용하는 방법도 제안되었으나[13], IMU의 성능이 좋지 않거나 임무시간이 길어질수록 오차가 커지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 PEM(Parametric Error Modeling)을 통한 INS 추정기법을 이용하는 방안이 제시되었으나[14], 이 역시 후처리가 필요하여 실시간 요동보상에 적용하기 어렵다. Smoothing 칼만필터를 사용할 수도 있으나[15], 일반적으로 역전파(Backward propagation)를 위한 후처리를 요구하므로 실시간성이 떨어진다.

GPS측정치의 정확도를 높여 잔여오차를 줄이는 방안도 있다. RTK(Real-Time Kinematics) 혹은 CDGPS(Carrier phase Differential GPS)를 사용하면 독립형 GPS에 비해 정확한 측정치를 항법에 사용할 수 있다[6][7]. 그러나 기지국의 GPS데이터를 요구하는 등의 물리적 한계가 있으므로 SAR 운용 시 적용이 어렵다는 단점이 있다.

IMU와 GPS데이터를 이용한 항법알고리즘에 위치감쇠루프(PDL, Position Damping Loop)를 적용하여 실시간으로 잔여오차를 제거하는 방안도 제시되었다[16]. 이 기법의 경우 PI(Proportional-Integral)관측기 형태의 PDL을 일반적인 약 결합(Loosely-coupled) 방식의 칼만필터에 결합하여, PDL의 감쇠 특성으로 위치의 불연속성을 제거하는 특성이 있다. 다만, GPS 위치보정 주기보다 빠른 주기의 PDL 동작으로 인해 샘플유지를 위한 추가 버퍼(Buffer)가 필요하다.

앞서 설명한 방법들은 SAR운용을 위한 독립적인 IMU 및 GPS가 SAR시스템에 장착되어, IMU의 가속도 및 각속도, 혹은 GPS 데이터를 직접 사용할 수 있는 경우에 적용가능하다. 특히 IMU가 안테나에 직접 장착되면 안테나의 미세한 진동까지 측정이 가능하여 정밀한 요동보상이 가능하다. 그러나 이 경우 SAR를 위한 추가적인 항법장치를 장착해야하므로, SAR 시스템 전체의 비용이나 중량을 증가시키는 요인이 된다. 이러한 점을 고려하여 SAR 요동보상 전용의 저사양의 IMU를 장착하거나, 혹은 비행체에 장착된 항법 급(Navigation grade)의 EGI 데이터를 받아 요동보상에 사용해야한다[17].

비행체로부터 받은 EGI 데이터를 사용할 경우

EGI와 안테나 사이의 거리 및 자세를 보정해 줘야 하며 플랫폼 진동에는 취약할 수 있으나, 이러한 단점은 SAR 안테나와의 거리가 먼 경우에 두드러지며 가까운 경우에는 문제가 되지 않는다. 또한 추가적인 항법장치의 장착이 필요 없다는 이점이 있다. 다만 이 경우에는 SAR 요동보상이 전혀 고려되지 않은 EGI 자체의 항법알고리즘을 통하여 가공된 위치, 속도, 자세를 수신하게 되므로, 위치 잔여오차가 그대로 존재한다. 또한 SAR 시스템과 비행체 EGI의 인터페이스의 문제로 가속도, 각속도와 같은 IMU raw data를 직접 수신할 수 없는 경우에는 앞서 제안된 방법들을 사용할 수 없다.

본 논문에서는 SAR 요동보상에 앞서, 비행체로부터 수신한 EGI 위치, 속도 데이터를 요동보상에 적합하도록 실시간으로 처리하는 위치 추정 알고리즘을 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 요동측정 오차가 SAR영상에 미치는 일반적인 영향에 대해서 알아보고, EGI의 오차가 일반적으로 가지는 특성을 실측데이터를 통해 살펴본다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 위치 추정 기법과 실측 데이터 처리결과를 설명한다. 4장에서는 비행시험에서 취득한 데이터에 대하여, 제안된 위치 추정 기법 적용 전/후를 분석해 제안한 기법의 유용성에 대해서 설명한다.

## II. EGI 오차 특성 분석

### 2.1 SAR 성능에 대한 요동측정 오차의 영향

SAR 수신 신호의 위상은 표적과 안테나위상중심(APC, Antenna Phase Center) 사이의 거리, 즉 경사 거리에 대한 함수이다. 따라서 요동측정 결과로부터 구해진 경사거리를 이용하여 요동보상을 수행하므로, 요동측정 오차에 의한 경사거리의 오차를 살펴봄으로써 요동측정의 결과가 SAR 영상에 미치는 영향을 판단할 수 있다.

표 1은 경사거리 오차가 SAR 영상에 미치는 영향을 유형 별로 나타내고 있다. 오차가 상수 혹은 선형일 경우에는 위치정확도에 영향을 주며, 고차로 갈수록 해상도, PSLR(Peak Side-Lobe Ratio) 및 ISLR(Integrated SLR)에 영향을 준다는 것을 알 수

있다[1]. 특히 sinusoidal 및 wideband 오차와 같이 PSLR과 ISLR을 악화시키는 오차는 허위표적(Spurious target) 등의 문제를 발생시켜 SAR 영상에 매우 좋지 못한 영향을 미치므로[6][7] 요동측정 시 가장 우선적으로 고려되어야 할 오차라고 할 수 있다.

표 1. 경사거리 오차유형 별 SAR에 대한 영향  
Table 1. Effects of slant range errors on SAR

Slant range error category	SAR image effects	
	Direction	Related performance
Constant	Range	Position accuracy
Linear	Azimuth	Position accuracy
Quadratic	Azimuth	Resolution
Sinusoidal	Azimuth	PSLR
Wideband	Azimuth	ISLR

### 2.2 EGI 실측데이터 오차 특성

본 절에서는 EGI 실측데이터 오차특성으로 인한 표적과 안테나 사이의 경사거리 오차특성을 분석한다. EGI 위치데이터는 일반적으로 위도, 경도, 고도로 출력되거나 ECEF(Earth Centered Earth Fixed) 좌표계로 출력된다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 ECEF 좌표계로 출력되는 EGI 데이터를 경사거리 계산에 사용한다.

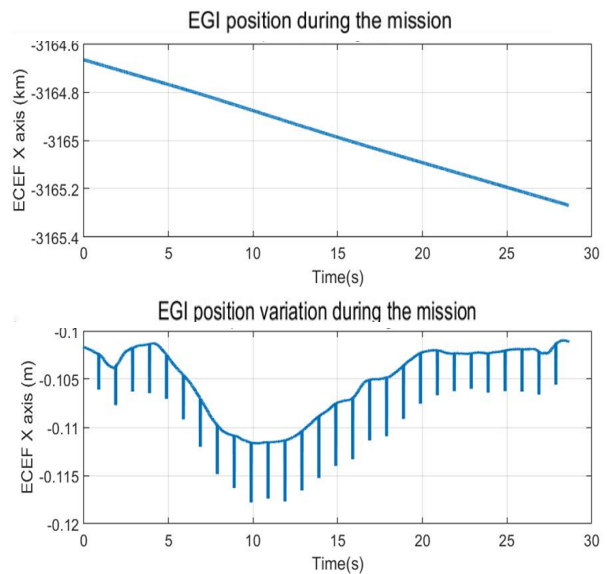


그림 1. EGI 위치(ECEF x축) 및 위치 변화  
Fig. 1. ECEF position output and its variation measured from EGI

그림 1에서 EGI 위치 변화  $\Delta \mathbf{r}_{EGI}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \mathbf{r}_{EGI,k} = \mathbf{r}_{EGI,k} - \mathbf{r}_{EGI,k-1} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{r}_{EGI,k}$ 는  $k$ 번째 샘플에 대한 EGI의 ECEF 위치를 나타낸다. GPS데이터를 통해 초당 1회의 업데이트되는 EGI 위치 데이터 특성을 그림 1의 위치 변화 그래프로 확인할 수 있다. EGI 데이터와 표적 중심의 좌표가 주어질 경우에 측정 경사거리  $R$ 은 다음과 같다.

$$R_k = \|\mathbf{r}_{EGI,k} - \mathbf{r}_{target}\|_2 \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{r}_{target}$ 는 spotlight SAR[1]-[3] 수행 시 영상 중심의 ECEF 좌표 위치를 나타내고,  $\|\cdot\|_2$ 는 2-norm을 의미한다. GPS 측정치 업데이트에 의한 EGI 데이터의 불연속성이 경사거리에 미치는 영향을 확인하기 위해 다음의 수식으로 같은 경사거리 변화를 정의한다.

$$\Delta R_k = R_k - R_{k-1} \quad (3)$$

그림 2는 그림 1의 위치데이터와 식 (2), (3)을 이용해서 구한 경사거리 및 경사거리 변화를 나타낸다. 그림 1의 EGI 위치 변화와 마찬가지로 매초마다 불연속성이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 특성은 그림 3의 경사거리 PSD(Power Spectral Density)와 같이 1Hz의 배수에 해당되는 주파수를 가지는 sinusoidal 신호들의 합으로 표현되는 오차를 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

이러한 오차 특성을 가지는 EGI 데이터로 요동보상을 수행하여 SAR 영상을 형성한 결과는 그림 4와 같다. 그림에서 방위 방향으로 일정한 간격의 허위 표적들이 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 표 1의 설명 및 그림 3에서 확인된 것처럼 EGI 데이터가 일정한 간격의 주파수 성분을 가지는 오차를 가지고 있기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서 이러한 오차를 실시간으로 제거할 수 있는 위치 추정 기법이 필요하다.

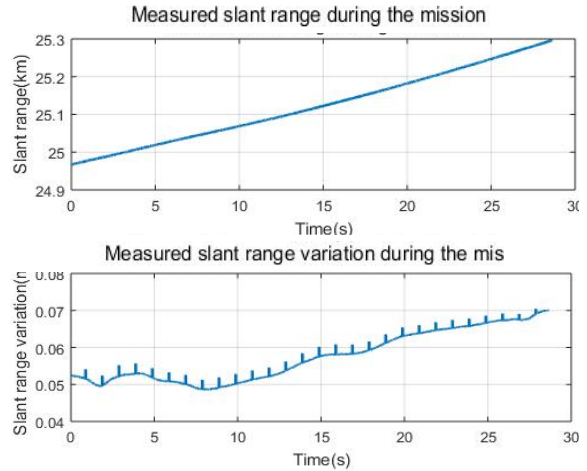


그림 2. EGI로 측정된 경사거리 및 경사거리 변화  
Fig. 2. Slant range and its variation measured from EGI

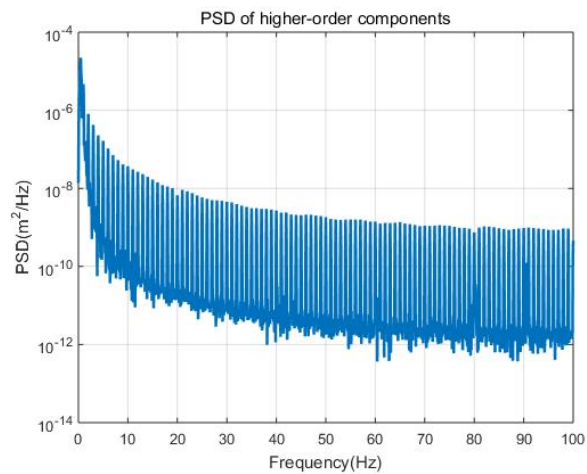


그림 3. EGI로 측정된 경사거리의 PSD  
Fig. 3. PSD of the slant range measured from EGI

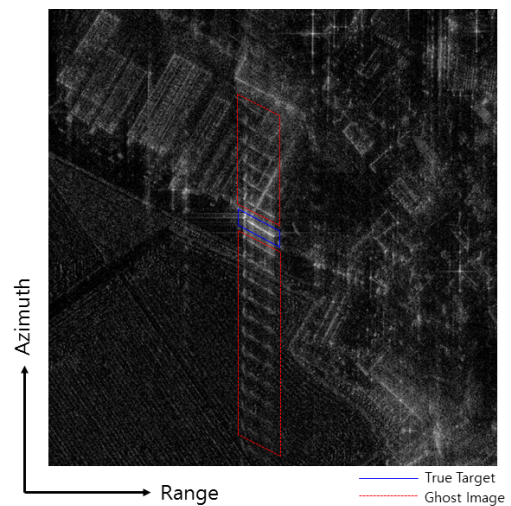


그림 4. EGI 위치 데이터로 요동보상 후 SAR 영상  
Fig. 4. SAR result after motion compensation with EGI position data

### III. 요동보상을 위한 위치 추정 기법

주기적으로 불연속점이 발생하는 EGI 위치 데이터와 같이, 주파수 특성을 가지는 오차들을 제거하기 위해 본 논문에서 소개하는 위치 추정 기법은 2가지이다. 첫 번째 방법은 EGI에서 측정된 속도를 적분하여 위치를 계산하는 방법이고, 두 번째 방법은 본 논문에서 제안하는 방법인 등속모델 기반의 추적필터를 이용하는 방법이다.

#### 3.1 속도적분 기반 위치 추정 기법

본 절에서 소개하는 위치 추정 기법은 EGI 측정 속도를 적분하는 방법으로, 주파수 특성을 가지는 오차특성을 낮은 연산 양으로도 비교적 잘 제거하여 SAR 요동보상에 자주 사용되는 기법이다[18]. 속도적분으로 추정된 위치  $\mathbf{r}_{VI}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_{VI,k} = \mathbf{r}_{EGI,k_0} + t_s \sum_{k=k_0}^{k_f} \mathbf{v}_{EGI,k} \quad (4)$$

여기서  $k_0$ 와  $k_f$ 는 각각 SAR 임무 시작 및 종료시점의 샘플 시간을 의미하고,  $t_s$ 는 샘플 주기,  $\mathbf{v}_{EGI}$ 는 EGI에서 출력된 ECEF 좌표계 속도이다. 즉, 임무 시작 시점의 EGI 위치만 사용하고, 그 후에는 위치는 사용하지 않고 속도만 적분해서 출력한다. 일반적으로 EGI는 GPS의 위치측정치로 업데이트되므로 속도의 불연속성은 위치에 비해 크지 않고, 적분의 특성으로 속도 출력의 잡음도 제거가능하다.

식 (4)의 속도적분 적용 전/후의 경사거리 및 경사거리 변화는 그림 5와 같다. EGI 위치 출력에서 발생하던 불연속성이 속도적분 적용 후 제거됨을 경사거리 변화 그래프에서 확인 할 수 있다. 그림 6은 속도적분 적용 전/후 경사거리의 고주파 성분을 PSD로 비교한 결과이다. 속도적분 적용 전에 나타난 1Hz의 배수의 주파수를 갖는 신호특성이 속도적분 후에 대부분 제거되는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다. 즉, 그림 4에서 확인한 SAR 영상의 허위 표적의 원인인 sinusoidal 신호들은 속도적분으로 제거가 가능하다는 것을 알 수 있다.

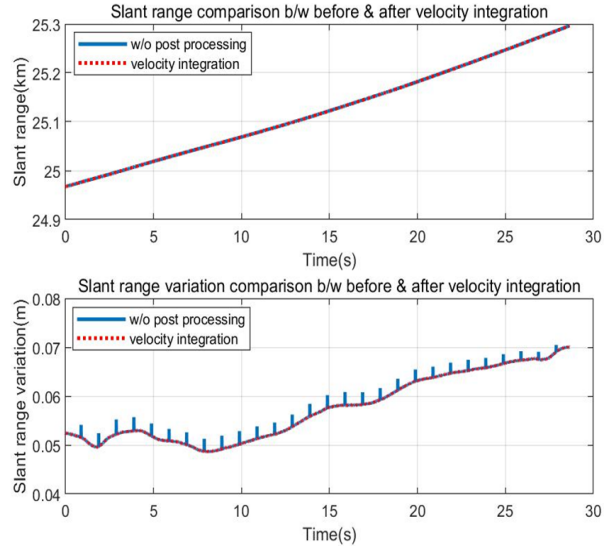


그림 5. 속도적분 전/후 경사거리 및 경사거리 변화  
Fig. 5. Slant range and its variation measured before and after velocity integration

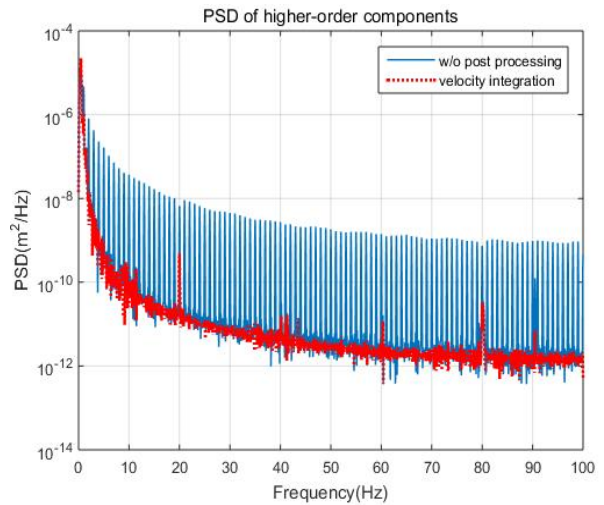


그림 6. 속도적분 전/후 경사거리 PSD  
Fig. 6. PSD of the slant range before and after velocity integration

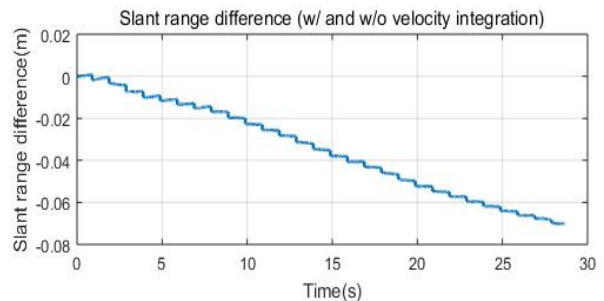


그림 7. 속도적분 전/후 경사거리 차이  
Fig. 7. Difference between the slant range before and after velocity integration

그러나 속도적분 전/후의 경사거리 차를 나타내는 그림 7에서 확인 할 수 있듯이 속도적분 후 경사거리 오차가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 항법장치의 속도 데이터에 편향오차(Bias error)가 존재하고 있기 때문인데, 속도데이터에 포함된 편향오차가 식 (4)에서 적분됨으로 인하여 경사거리의 오차가 시간에 따라 선형으로 증가하게 된다. 이러한 오차는 표1에서 설명한 것처럼 방위방향 위치 오차를 발생시키고, 이는 SAA(Synthetic Aperture Angle)이 클수록 더 심각해진다[1][19].

### 3.2 추적필터 기반 위치 추정 기법

본 절에서는 앞서 설명한 속도적분 방법의 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서 제안하는 추적필터 기반의 위치 추정 기법을 소개한다. 속도적분의 선형오차는 EGI의 위치정보를 전혀 사용하지 않기 때문에 발생하는 문제이므로, 제안하는 방법은 EGI의 위치와 속도를 측정값으로 하는 칼만필터를 등속모델을 바탕으로 구성하는 방식이다. EGI의 위치와 속도를 동시에 사용하므로 가관측성(Observability)가 보장되고, 칼만필터의 동역학(Dynamics)은 항상 안정되어 있으므로 그림 7과 같이 위치가 발산하는 문제를 해결할 수 있다. 칼만필터의 모델이 되는 등속모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} \quad (5)$$

여기서  $x_k$ ,  $\Phi_k$ 는 각각 식 (6), (7)과 같다.

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & t_s \cdot I_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_k = [\mathbf{r}_k \ \mathbf{v}_k]^T \quad (7)$$

여기서  $t_s$ 는 EGI의 sampling time,  $\mathbf{r}_k$ 와  $\mathbf{v}_k$ 는 각각 ECEF 3축에 대한  $k$ 번째 샘플에 대한 위치와 속도를 나타내고,  $I_{3 \times 3}$ 과  $O_{3 \times 3}$ 는 각각  $3 \times 3$ 의 크기를 가지는 단위행렬과 영행렬을 나타낸다. 등속모델에 대한 칼만필터의 잡음공분산 행렬은 다음의 식 (8), (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_k = q \begin{bmatrix} \frac{t_s^3}{3} \cdot I_{3 \times 3} & \frac{t_s^2}{2} \cdot I_{3 \times 3} \\ \frac{t_s^2}{2} \cdot I_{3 \times 3} & t_s \cdot I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} r_p \cdot I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & r_v \cdot I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $Q_k$ ,  $R_k$ 는 각각 시스템 잡음과 측정 잡음공분산 행렬을 나타내고,  $q$ ,  $r_p$ ,  $r_v$ 는 각각 시스템, 측정 위치, 측정 속도의 잡음공분산 크기를 대표하는 스칼라 값을 나타낸다. 이 스칼라 값을 조정함으로써 필터의 특성 조절이 가능하다.

식 (5)~(9)의 모델을 칼만필터에 적용하는 것이 본 논문에서 제안하는 위치 추정 기법으로, 결과는 그림 8, 9 및 표 2와 같다. 속도적분과 달리 제안하는 방법은 식 (8), (9)의 칼만필터 매개변수 조절을 통해 특성 조절이 가능하므로,  $q = r_v = 1$ 로 고정하고 위치측정치에 대한 가중치를 조절하는  $r_p$  값을 4가지 경우로 조정해가며 결과의 차이를 살펴보았다. 앞서 설명한 그림 6의 속도적분 결과와 마찬가지로, 제안된 기법을 사용한 4가지 경우 모두 1Hz 배수에 해당되는 성분들이 대부분 제거되는 것을 그림 8을 통해 확인할 수 있다. 이는 등속모델을 기반으로 한 칼만필터가 저역통과필터(Lowpass filter)의 역할을 수행하기 때문이다.

다만 표 2에서 확인할 수 있듯이,  $r_p$  값이 작아질수록 불연속성을 가지는 EGI 위치 정보를 더 많이 사용하게 되어 1Hz이상 고주파 성분 제거 성능 열화가 있으나, 그 차이가 최대 0.5dB 정도로 크지 않음을 알 수 있다.

표 2. 위치 추정 기법 별 적용 전/후 경사거리 특성  
Table 2. Slant range characteristics before and after applying each position estimation method

Slant range characteristics comparison	Velocity integration	Proposed method			
		$r_p=300$	$r_p=100$	$r_p=10$	$r_p=1$
Linear error (m)	0.0702	0.0690	0.0479	0.0095	0.0041
Attenuation ratio of high frequency (above 1Hz) components (dB)	-5.7384	-5.7968	-5.7919	-5.7577	-5.2373

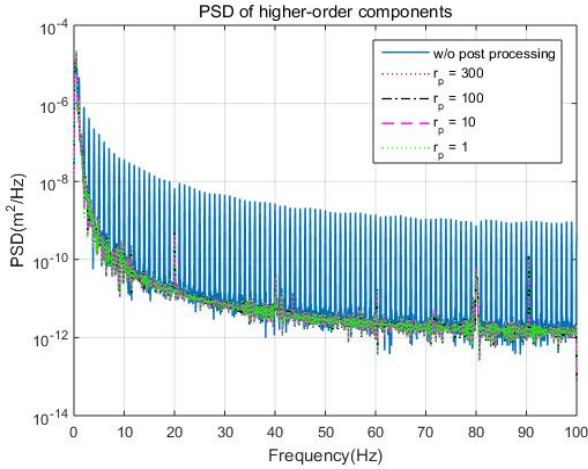


그림 8. 추적필터 적용 전/후 경사거리 PSD  
Fig. 8. PSD of the slant range before and after tracking filtering

제안하는 방식과 속도적분 방식과의 가장 큰 차이는 그림 9에서 확인할 수 있다. 그림 7의 속도적분 결과에는 속도 데이터 편향오차에 의한 위치 추정의 선형 오차가 존재한 반면, 제안한 위치 추정 기법을 적용한 그림 9에서는  $r_p$  값이 작아짐에 따라 제거되는 것을 확인할 수 있다. 이는 칼만필터의 측정치로 EGI 위치가 포함되어 매 순간 상태변수 갱신에 사용되므로 위치 추정에 대한 가관측성 및 안정성이 확보되기 때문이다. 따라서  $r_p$  를 줄임으로써 위치오차의 증가를 방지할 수 있고 최종적으로 SAR 영상의 위치정확도도 보장할 수 있다.

앞선 결과들을 통해 위치잡음과 속도잡음의 비율 조정을 통하여 주파수 특성 오차와 선형 오차의 비율이 조정가능하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존 속도적분 기법과 달리, SAR 영상 요구규격에

따른 최적화가 가능하다. 예를 들어 SAR 영상의 요구규격 중 위치정확도에 여유가 있을 경우 위치측정치 공분산을 크게 하여 주파수특성의 오차를 최소화하고, 반대로 PSLR 및 ISLR 규격에 여유가 있는 경우에는 위치측정치 공분산을 작게 하여 선형 오차를 최소화 할 수 있다. 결국 3.1절에서 설명한 속도적분 방법은 본 절에서 설명하는 추적필터 방법의 특수한 경우라고 볼 수 있고, 추적필터를 이용한 위치 추정 기법이 보다 일반적인 방법이라 할 수 있다. 특히 표 2와 같이 고주파 성분 제거율의 차이가 크지 않으면 PSLR 및 ISLR 성능은 PGA [1][3] 결과에 의존적이므로 튜닝을 통해 위치정확도, PSLR 및 ISLR을 모두 최적화하는 것이 가능하다. 이에 대해서는 다음 장에서 자세히 설명한다.

#### IV. 요동보상을 위한 위치 추정 기법 적용 전/후 SAR 영상

본 장에서는 같은 SAR 데이터 및 EGI 데이터에 3장에서 설명한 두 가지 위치 추정 기법을 적용했을 경우의 SAR 영상을 살펴보고, 위치 추정 기법 적용 전/후의 영상을 비교한다. 데이터는 [8]의 테스트베드를 통해 수집되었고, 고도 약 3.3km, 경사거리 약 25km에서 임무를 수행하였다. 영상중심의 요동보상이 수행되었고, SAR 영상형성 알고리즘은 PFA(Polar Format Algorithm)[1][3]을 사용하였으며, 최종적으로 PGA가 적용되었다. 3장에서는 설명이 생략된 EGI와 안테나 간의 레버암 보상이 적용되었다.

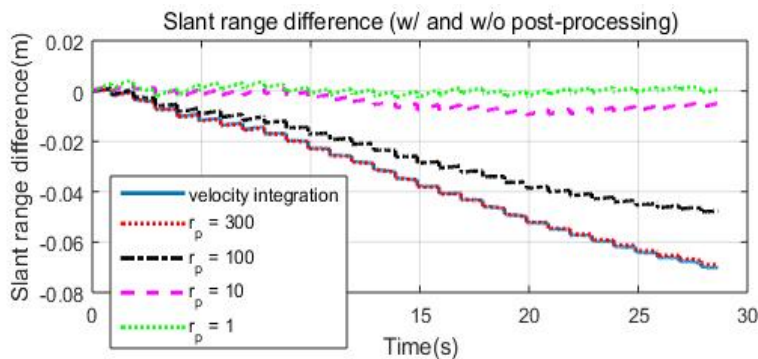


그림 9. 추적필터 적용 전/후 경사거리 차이  
Fig. 9. Difference between the slant range before and after tracking filtering

4.1 속도적분 기반 위치 추정 기법 적용 영상

속도적분 기반 위치 추정 기법 적용 전/후 데이터로 요동보상 한 SAR 영상의 차이는 그림 10에서 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있는 것과 같이, 위치 추정 기법 적용 전 영상에서 나타난 허위 표적들은 적용 후에 대부분 제거됨을 알 수 있다. 그러나 3.1절에서 설명한 바와 같이, 선형 오차로 인한 방위방향 위치 정확도 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

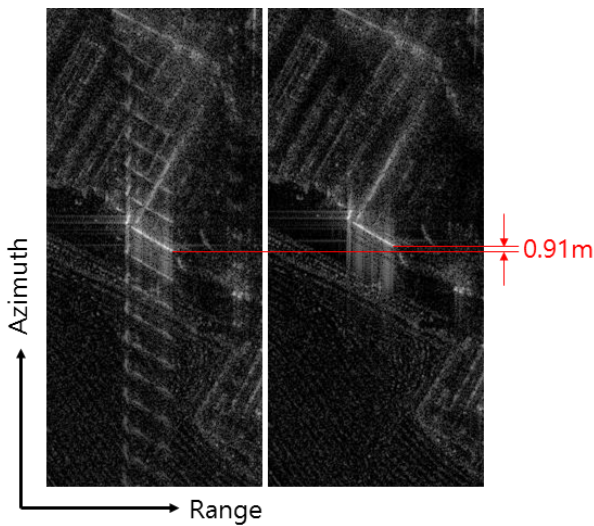


그림 10. 속도적분 기반 위치 추정 기법 적용 전(좌)/후(우) SAR 영상

Fig. 10. SAR result before(left)/after(right) the position estimation based on velocity integration

본 시험 데이터 수집 시 선형오차는 약 7cm에 불과하나, 영상위치오차는 약 0.91m가 발생했다. 이러한 위치오차는 선형오차의 크기에 비례하므로[1] 임무환경(SAA, 속도편향오차, 임무시간 등)에 따라 수십 m에 달할 수도 있다.

4.2 추적필터 기반 위치 추정 기법 적용 영상

추적필터 기반의 위치 추정 기법 적용 전/후 SAR 영상을 속도적분 결과와 비교한 결과는 표 3과 그림 11~13과 같다.

표 3은 비행시험 시 설치된 점표적의 영상으로부터 획득한 결과로, 표에서 확인할 수 있듯이 제안한 기법의 결과는 속도적분과 달리  $r_p$  값이 작아질수록 표적위치 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히  $r_p = 1$ 인 경우에는 항법데이터 처리에 의한 표적위치오차가 발생하지 않는데, 이는 표 2에서 확인한 선형오차 크기의 경향과 정확히 일치한다.

표 3. 위치 추정 기법 별 적용 전/후 SAR 방위 성능  
Table 3. SAR azimuth performance before and after applying each position estimation method

SAR performanc (azimuth)	Velocity integration	Proposed method			
		$r_p=300$	$r_p=100$	$r_p=10$	$r_p=1$
Position error (m)	0.91	0.91	0.68	0.23	0.00
PSLR (dB)	-21.54	-19.94	-18.39	-19.93	-23.60
ISLR (dB)	-13.95	-13.98	-13.47	-14.10	-14.84

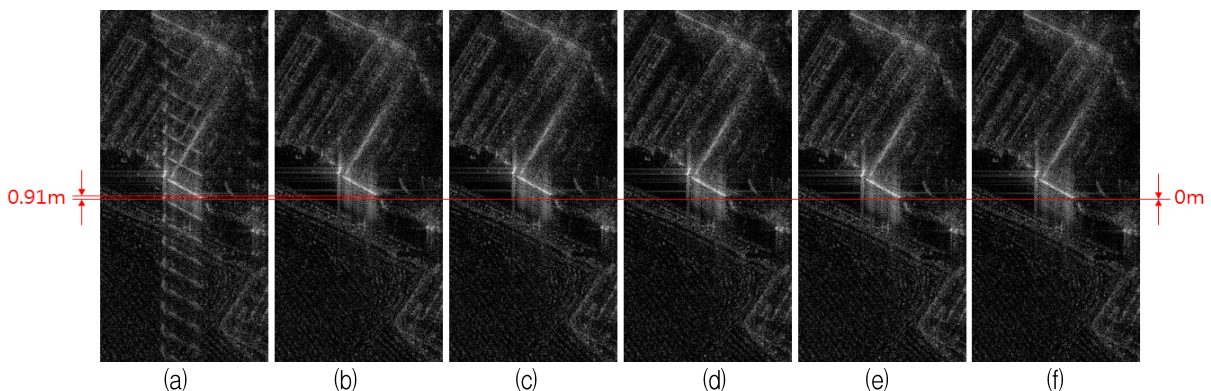


그림 11. 위치 추정 기법 별 영상. (a)는 위치 추정 기법 적용 전 결과, (b)는 속도적분 결과, (c)~(f)는 각각  $r_p$ 가 300, 100, 10, 1인 경우에 대한 추적필터 기반 위치 추정 기법 결과를 나타낸다.

Fig. 11. SAR result with respect to the each position estimation technique. (a) and (b) represent the result before applying the position estimation technique and after velocity integration. (c)~(f) represent the result after the position estimation technique based on the tracking filter with  $r_p = 300, 100, 10, 1$ , respectively



또한 그림 11에서도 확인할 수 있듯이,  $r_p$  값이 작아질수록 표적의 위치오차가 점점 작아지고  $r_p = 1$ 인 경우 표적 위치 오차가 완전히 제거된다. 따라서 제안한 기법을 사용할 경우 적절한 튜닝을 통해 기존 속도적분 방식에 비해 SAR 위치 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

PSLR과 ISLR의 경우 표적위치오차와 달리 적용 기법에 따른 일관된 경향이 보이지 않음을 확인할 수 있다. 이는 표 2에서 확인할 수 있듯이 기법 별 고주파 성분 제거율의 차이가 크지 않기 때문이다.

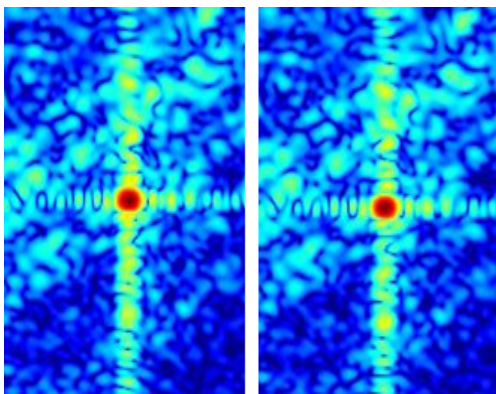


그림 12. 속도적분 방식(좌) 및 제안된 방식(우)의 위치 추정 기법에 대한 점표적 확대 영상

Fig. 12. SAR point target result based on the velocity integration(left) and the proposed method(right)

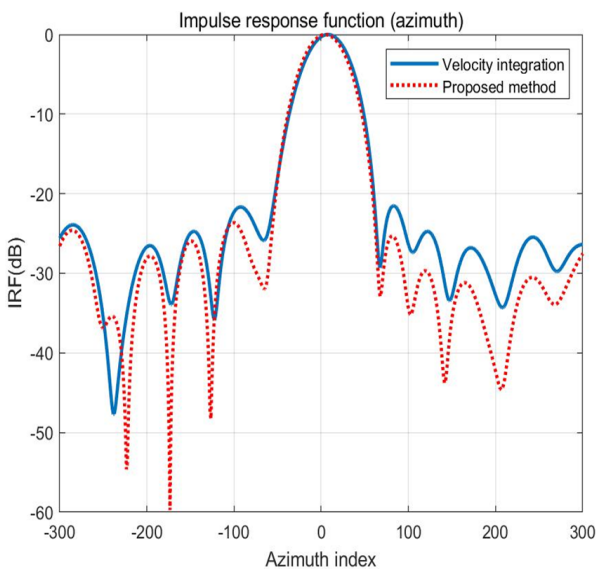


그림 13. 속도적분 방식 및 제안된 방식의 위치 추정 기법에 대한 점표적 IRF 비교

Fig. 13. Comparison SAR IRF of point target based on the velocity integration and the proposed method

따라서 PSLR과 ISLR의 상대적인 차이는 PGA 결과에 의존적이 되므로,  $r_p = 1$ 인 경우가 고주파 성분 제거율이 상대적으로 가장 낮음에도 PSLR과 ISLR 성능이 가장 좋은 결과를 나타낸다.

그림 12의 점표적 확대영상과 그림 13의 점표적 IRF(Impulse Response Function) 결과에서도 속도적분에 비해 제안된 기법( $r_p = 1$ )의 경우 해상도의 열화 없이 부엽(Side-lobe)의 크기를 감소하여 영상의 번짐 현상을 소폭 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 결론적으로, 제안한 기법은 적절한 튜닝을 통해 위치정확도와 PSLR, ISLR의 최적화가 가능하다는 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 SAR 요동보상을 위한 전용항법시스템이 없는 경우, 비행체에 장착된 EGI로부터 수신하는 위치, 속도 데이터를 처리하여 SAR 요동보상에 적합한 데이터를 출력하는 위치 추정 기법을 제안하였다. 요동측정 오차가 SAR 영상에 미치는 일반적인 영향을 설명하고, GPS 보정에 의한 주기적인 불연속성을 가지는 EGI 출력데이터에서 주파수 특성을 가지는 오차들을 제거해야함을 확인하였다. 주파수 특성 오차 제거를 위해 기존에 적용되던 속도적분 방식이 가지는 위치정확도 문제를 해결할 수 있는 추적필터 기반의 위치 추정 기법을 제안하였다.

제안된 기법은 매개변수 조정을 통해 오차특성을 조정할 수 있고, 본 논문에서는 매개변수  $q$ ,  $r_v$ 를 고정하고  $r_p$ 를 4가지 경우로 조정한 결과를 살펴보았다. 제안된 기법을 사용한 결과 EGI 위치 출력의 불연속성이 야기하는 주파수 특성을 가지는 오차를 효과적으로 제거함은 물론, 속도적분 방식의 문제였던 속도 편향오차에 의한 선형 위치 오차도 제거가 가능하다. 특히  $r_p$ 값이 줄어들수록 고주파 성분 제거 성능이 소폭 열화 되지만, 선형 위치오차는 감소하여 SAR 요구 성능에 따라 매개변수 조정이 가능하다.

제안된 위치 추정 기법을 비행시험 데이터에 적용한 결과 SAR 표적 위치의 왜곡 없이 영상의 품질을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 특히 제안한

기법을 SAR 요동보상에 적용할 경우 매개변수 조정을 통해 위치정확도, PSLR 및 ISLR 성능의 최적화가 가능하다. 속도적분에서 발생한 영상 위치 오차를 매개변수 조정으로 제거 혹은 감소시키면서 영상의 부엽 특성도 기존의 방법 보다 개선 가능한 것을 비행시험 데이터를 통해 확인할 수 있었다. SAR 영상의 대표적인 성능인 PSLR 및 ISLR을 튜닝을 통해 개선할 수 있음을 점표적에 대한 IRF확인을 통해 확인하였다.

### References

- [1] W. Carrara, R. Goodman, and R. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms,(ser. Artech House remote sensing library)", Norwood, MA, USA: Artech House, pp 1-243, 1995.
- [2] Ian G. Cumming and Frank H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation", Boston/London: Artech House, 2005.
- [3] Jakowatz, C. V. J., et al, "Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach: A Signal Processing Approach", Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] John C. Kirk, "Motion compensation for synthetic aperture radar", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 11, No. 3, pp. 338-348, May 1975.
- [5] Mengdao Xing and Xiuwei Jiang, et al, "Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, No. 8, pp. 2870-2883, Aug 2009.
- [6] Theodore J. Kim, "Motion measurement for high-accuracy real-time airborne SAR", Radar Sensor Technology VIII and Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VII, Vol. 5410, pp. 36-45, Aug. 2004.
- [7] Theodore J. Kim, J. Rick Fellerhoff, and Stewart M. Kohler, "An Integrated Navigation System Using GPS Carrier Phase for Real-Time Airborne/Synthetic Aperture Radar (SAR)", Journal of the Institute of Navigation, Vol. 48, No. 1, pp. 13-24, Apr. 2001.
- [8] Wahl, DEPH Eichel, et al, "Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, No. 3, pp. 827-835, Jul. 1994.
- [9] Chan, Hian Lim and Tat Soon Yeo, "Noniterative quality phase-gradient autofocus (QPGA) algorithm for spotlight SAR imagery", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5, pp. 1531-1539, Sep. 1998.
- [10] E Bleszynski, M Bleszynski, and T Jaroszewicz, "Autofocus algorithm for synthetic aperture radar imaging with large curvilinear apertures", Inverse Problems, Vol. 29, No. 5, Article id. 054004, Apr. 2013
- [11] S. Buckreuss, "Motion compensation for airborne SAR based on inertial data, RDM and GPS", Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 4. IEEE, Pasadena, CA, USA, pp. 1971-1973, Aug. 1994.
- [12] Xing, Mengdao, Xiuwei Jiang, and Renbiao Wu, "Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, No. 8, pp. 2870-2883, Sep. 2009.
- [13] Fang, Jiancheng and Xiaolin Gong, "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, pp. 909-915, Apr. 2009.
- [14] Yong-gonjong Park, Young Bum Park, Jaehyun Jung, Hee Sub Shin, and Chan Gook Park, "Novel Motion Sensing Algorithm for Improving SAR Imaging by Parametric Error Modeling", International Journal of Aeronautical and Space

Sciences, Vol. 20, No. 3, pp. 761-767, Mar. 2019.

- [15] Simon, Dan, "Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches", John Wiley & Sons, 2006.
- [16] Jin Woo Song and Chan Gook Park, "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, pp. 118-128, Mar. 2017.
- [17] Hyun-Ik Shin and Kyoung-Il Kwon, et al, "SAR Test-bed to Acquire Raw Data and Form Real-time Image", Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 2, pp. 181-186, Apr. 2017.
- [18] Kusk, Anders, "Estimating Sensor Motion in Airborne SAR", Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark(DTU), 2017.
- [19] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, "Motion compensation errors: Effects on the accuracy of airborne SAR images", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 41, No. 4, pp. 1338-1352, Oct. 2005.

정 창 식 (Chang-Sik Jung)



1990년 2월 : 경북대학교  
전자공학과(공학사)  
1992년 2월 : 경북대학교  
전자공학과(공학석사)  
1992년 3월 ~ 현재 : 국방과학  
연구소 연구원  
관심분야 : 레이더 체계/시험평가

김 기 완 (Ki-Wan Kim)



2000년 2월 : 전북대학교  
기계공학부 항공우주공학  
전공(공학사)  
2002년 2월 : 전북대학교  
정밀기계공학과 항공우주  
공학전공(공학석사)  
2006년 2월 : 한국과학기술원  
기계공학과 항공우주공학전공(공학박사)  
2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원  
관심분야 : 항공기 탑재 레이더 체계/시험평가

저자소개

이 해 민 (Haemin Lee)



2009년 1월 : 한국과학기술원  
기계공학과(공학사)  
2011년 2월 : 한국과학기술원  
기계공학과(공학석사)  
2016년 2월 : 한국과학기술원  
기계공학과(공학박사)  
2016년 2월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 연구원  
관심분야 : 최적제어, 항법, SAR 신호처리