

항공용 SAR 시스템에서의 효과적인 실시간 요동보상 방법

Effective Method of Real-Time Motion Compensation for Airborne Synthetic Aperture Radar System

김형석 · 황정훈 · 윤상호

Hyung-Suk Kim · Jeonghun Hwang · Sang-Ho Yoon

요약

항공용 SAR(synthetic aperture radar) 시스템은 비행환경에 의해 필연적으로 발생하는 요동을 보상하는 단계가 필수적이다. 고해상도의 SAR 영상형성과 온보드 SAR 신호처리 수행을 위해서는 실시간 요동보상 기능이 SAR 시스템 내에 적절히 구현되어야 한다. 본 논문에서는 SAR 영상 품질에 직접적인 영향을 미치는 항공기 요동을 예측하고 실시간으로 보상하는 레이더 타이밍 신호 발생기의 효과적인 구현 방식을 제안한다. 그리고 항공용 SAR 시스템에 적합한 요동 예측 방법에 대해서도 기술한다. 제안된 방식의 실시간 요동보상 방식에 대한 검증은 민간 항공기를 이용한 탑재비행시험을 통해 수행되었다.

Abstract

Aircraft inevitably experience motion caused by the flight environment in airborne synthetic aperture radar (SAR) systems. Therefore, motion compensation is essential. The real-time motion method is vital for high-resolution SAR image formation and onboard SAR signal processing. In this paper, an effective implementation scheme for a radar-timing signal generator is presented. This paper also describes a motion prediction method suitable for airborne SAR systems. The performance of the proposed real-time motion compensation scheme was evaluated using a captive flight test.

Key words: Airborne SAR, Real-Time, Motion Compensation, Motion Prediction, Radar Timing Signal Generator

I. 서론

SAR 시스템은 원격탐사 분야에서 광범위하게 활용되고 있는 영상 센서로서 주야간 전천후로 운용이 가능한 특징이 있다. 우주와 항공 분야에서 다양한 플랫폼에 탑재되어 고해상도의 SAR 영상을 제공하고 있으며, 민간뿐만 아니라 군사적 목적으로 널리 이용되고 있다.

일반적인 레이더는 시간 지연을 통해 표적의 거리를 측정하고, 안테나의 방향성을 이용하여 표적의 방향을 측정한다. 또한 표적의 속도를 측정하기 위해 도플러 이동(Doppler shift) 정보를 사용한다. 이러한 도플러 이동 정보가 또한 방위방향 해상도를 향상시킬 수 있음이 발견되었고, 이를 토대로 SAR 시스템의 개념이 정립되었다.

레이더의 거리방향 해상도는 송신신호의 대역폭에 비

국방과학연구소 레이더/전자전 기술센터(Radar & EW Technology Center, Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 19, 2022 ; Revised May 3, 2022 ; Accepted June 10, 2022. (ID No. 202220419-040)

· Corresponding Author: Hyung-Suk Kim (e-mail: hskim@add.re.kr)

레하고, 방위방향 해상도는 방위각 빔폭에 반비례하게 된다. 이에 반해 SAR은 방위방향 해상도를 향상시키기 위해 직선으로 움직이는 플랫폼에서 수신신호의 도플러 주파수가 선형으로 변하는 성질을 이용한다. 직선으로 이동하는 레이다가 전자파를 송수신하면 특정 표적으로부터 반사된 신호는 선형으로 변조된 도플러 주파수를 가지게 된다. 선형으로 주파수 변조된 수신신호에 정합필터를 적용하면 방위방향 해상도를 향상시킬 수 있다^[1].

위성용 SAR 시스템은 플랫폼의 속도가 빠르고 대기가 없는 환경에서 운용되기 때문에 요동의 의한 영향이 거의 없다. 이와 반대로 항공용 SAR 시스템이 운용되는 환경은 상대적으로 플랫폼의 속도가 느리고 대기에 의한 외란도 많이 발생하기 때문에, 요동의 영향이 크게 작용한다. 따라서 일반적인 항공용 SAR 시스템에서는 플랫폼이 계획된 직선경로에서 벗어난 요동을 항법장치 등을 이용하여 측정하고, 이를 보상하는 과정이 필수적이다. 최근에 다양한 분야에서 널리 활용되고 있는 무인기 SAR 시스템은 고해상도의 SAR 영상을 실시간으로 형성하여 지상의 운용자에게 전송한다. 온보드 SAR 영상을 형성하기 위한 다양한 방식의 실시간 요동보상 기법에 대한 연구가 SAR 시스템 개발 분야에서 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 항공용 SAR 시스템에 효과적으로 적용 가능한 실시간 요동보상 방법을 제안한다. 이를 위해 레이더 타이밍 신호 발생기의 하드웨어 및 소프트웨어의 효율적인 구조 설계에 대해 먼저 기술한다. 그리고 항법장치로부터 획득된 항법정보를 이용하여 실시간으로 안테나 위상 중심(antenna phase center, APC)을 예측하는 방법에 대해 설명한다. 마지막으로 제안한 방식의 실시간 요동보상 방법의 검증을 위해 민간 항공기를 이용하여 수행한 탑재비행시험(captive flight test, CFT) 결과를 제시한다^{[2][3]}.

II. 항공용 SAR 시스템

항공용 SAR 시스템은 SAR 센서 부분과 SAR 영상 관측/분석 부분으로 구성된다. SAR 센서는 레이더 플랫폼이 계획된 경로를 따라 이동하면서 정의된 시간 간격에 맞춰 전자기파 펄스를 송수신하고, 수신된 신호에 SAR

신호처리 알고리즘을 적용하여 SAR 영상을 생성한다. 생성된 영상은 SAR 영상 관측/분석 장비로 제공한다. 그리고 SAR 영상 관측/분석 장비는 SAR 영상으로부터 유의한 정보를 추출하는 역할을 담당한다.

SAR 시스템은 레이더 플랫폼이 직선 경로를 따라 등속으로 이동하면서 일정한 거리 간격으로 전자기파 펄스를 송수신한다는 가정하에서 SAR 신호처리를 수행한다. 하지만 대부분의 항공용 SAR 시스템의 실제 환경에서는 등속 직선 비행은 거의 불가능하다. 따라서 필연적으로 항공용 SAR 시스템에는 레이더 플랫폼이 계획 경로에서 벗어나는 요동을 측정하고 보상하는 단계가 요구된다.

2-1 SAR 센서 구성

그림 1은 일반적인 항공용 SAR 센서의 구성에 대한 개요를 나타낸다. SAR 센서는 기본적으로 레이더 펄스 신호를 송수신하기 위한 송수신기와 안테나로 구성되어 있다^[4]. 또한 레이더 펄스 신호의 송수신 타이밍을 제어하기 위한 타이밍 신호를 생성하는 레이더 타이밍 신호 발생기와 수신된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 아날로그-디지털 변환기도 필요하다. 그리고 SAR 신호처

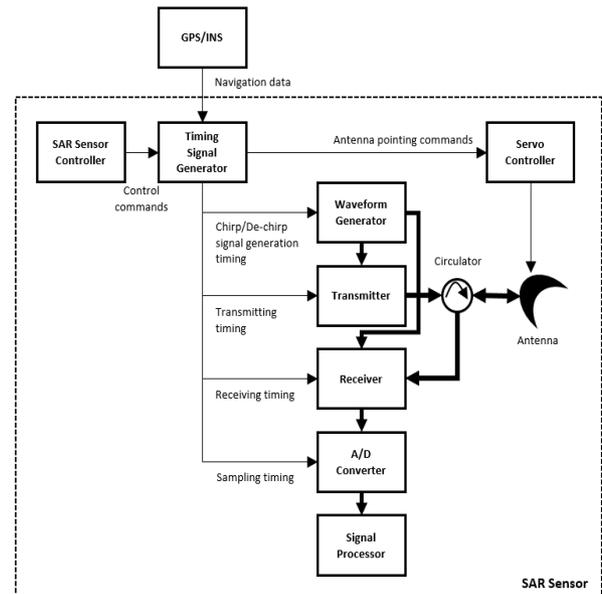


그림 1. 항공용 SAR 센서 개요
Fig. 1. Airborne SAR sensor overview.

리기는 적절한 신호처리 알고리즘을 수신 신호에 적용하여 고해상도의 SAR 영상을 형성한다.

2-2 SAR 신호 모델

그림 2는 SAR 데이터 획득과 관련하여 레이더 플랫폼의 위치와 지면 위에 형성되는 안테나 빔 영역 사이의 간략화한 기하 모델을 나타낸다^[5].

SAR 신호 모델은 두 가지 가정하에서 출발한다. 먼저 레이더 플랫폼은 식 (1)과 같이 x축을 따라 등속으로 직선 비행을 한다고 가정한다. 그리고 점표적은 식 (2)와 같이 y축 상에 위치하고 정지한 상태이다.

$$r_p(t) = \begin{bmatrix} x_p(t) \\ y_p(t) \\ z_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_p t \\ 0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$r_t(t) = \begin{bmatrix} x_t(t) \\ y_t(t) \\ z_t(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

SAR 신호처리에서 가장 중요한 파라미터인 레이더로부터 표적까지의 경사거리는 식 (3)~식 (5)와 같이 표현된다. 식 (5)에서와 같이 표적까지의 경사거리는 시간에 따라 포물선 형태로 변하게 된다.

$$r(t) = \| r_t(t) - r_p(t) \| = \sqrt{(v_p t)^2 + y_0^2 + (z_0 - z_p)^2} \quad (3)$$

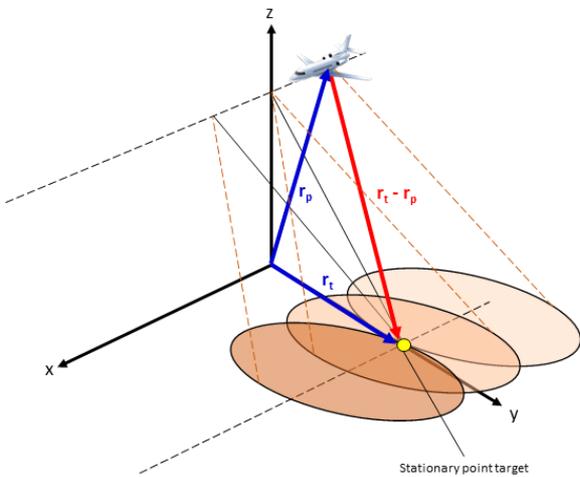


그림 2. SAR 데이터 획득 기하 모델
Fig. 2. SAR data acquisition geometry model.

$$r_0 = \sqrt{y_0^2 + (z_0 - z_p)^2} \quad (4)$$

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + (v_p t)^2} \cong r_0 + \frac{v_p^2}{2r_0} t^2 \quad (5)$$

레이더 펄스 송신과 수신 신호 모델은 각각 식 (6)과 식 (7)로 표현될 수 있다. 그리고 식 (8)에서와 같이 표적까지의 경사거리 변화는 수신신호에서의 도플러 주파수 변조 형태로 나타나게 된다. SAR 신호처리의 기본 과정은 선형으로 주파수 변조된 신호에 정합필터의 개념을 적용하여 압축을 수행함으로써 방위방향으로 향상된 해상도의 영상을 얻는 과정이다^{[1],[4]}.

$$s_t(t,n) = A_0 \text{rect} \left[\frac{t-nT}{\tau_p} \right] \times \exp [j2\pi f_c t] \times \exp [j\pi\gamma(t-nT)^2] \quad (6)$$

$$s_r(t,n) = A_r(t) \times \text{rect} \left[\frac{t-nT - \frac{2r(t)}{c}}{\tau_p} \right] \times \exp \left[j2\pi f_c \left\{ t - \frac{2r(t)}{c} \right\} \right] \times \exp \left[j\pi\gamma \left\{ t - nT - \frac{2r(t)}{c} \right\}^2 \right] \quad (7)$$

$$s_b(t,n) = A_r(t) \times \text{rect} \left[\frac{t-nT - \frac{2r(t)}{c}}{\tau_p} \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi f_c r(t)}{c} \right] \times \exp \left[j\pi\gamma \left\{ t - nT - \frac{2r(t)}{c} \right\}^2 \right] \quad (8)$$

III. 항공용 SAR 요동보상

실제 레이더 플랫폼은 그림 3과 같이 바람, 비행체 진동 등 여러 가지 요인에 의해 발생하는 요동의 영향으로 계획된 비행경로와 다른 방향으로 움직이게 된다.

식 (9)에서와 같이 계획경로에서 이탈된 경사거리 $\Delta r(t)$ 에 해당하는 양만큼의 방위방향 위상 오차가 발생하게 된다. 이러한 방위방향 위상 오차는 SAR 영상 품질에 직접적인 영향을 미친다. 일반적으로 위상 오차의 1차항 성분은 SAR 영상에서의 방위 위치 이동 현상으로 나타난다. 그리고 2차항 성분은 SAR 영상 품질 지표 중 하

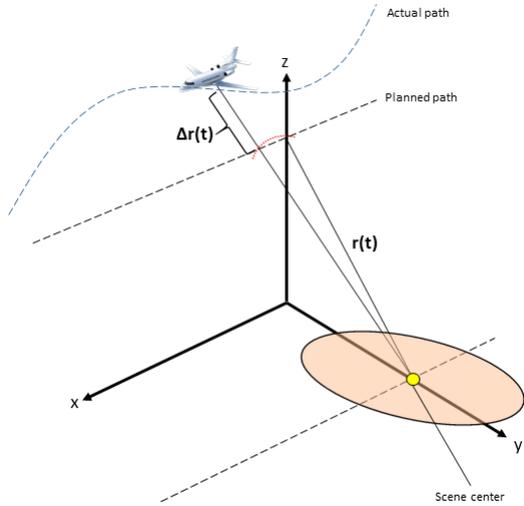


그림 3. SAR 시나리오
Fig. 3. SAR scenario.

나인 PSLR(peak side lobe ratio)에 영향을 미쳐 SAR 영상의 초점이 흐려지게 되는 결과로 나타난다. 3차 이상의 고차항 성분은 주로 ISLR(integrated side lobe ratio) 성능에 영향을 미치며, SAR 영상의 대조비 성능을 저하시키게 된다^{3),6)}.

$$s_b(t,n) = A_r(t) \times \text{rect} \left[\frac{t - nT - \frac{2r(t) + 2\Delta r(t)}{c}}{\tau_p} \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi f_c r(t) + 4\pi f_c \Delta r(t)}{c} \right] \times \exp \left[j\pi \gamma \left\{ t - nT - \frac{2r(t) + 2\Delta r(t)}{c} \right\}^2 \right] \quad (9)$$

레이다 플랫폼이 경험하는 요동은 자세 변화, 진행방향 속도 변화 그리고 거리방향 위치 변화로 분류할 수 있다. SAR 영상 품질 저하를 막기 위해 이러한 요동은 반드시 보상이 되어야 한다^{7),8)}. 항공용 SAR 시스템에서의 실시간 요동보상은 다음의 세 가지 과정을 통해 이루어지도록 설계하는 것이 필요하다.

3.1 안테나 빔 지향 제어

레이다 플랫폼의 자세 변화는 안테나 빔 지향과 관련되어 있다. 안테나 빔 영역이 SAR 영상에 위치하도록 자세 변화에 따라 안테나 빔지향 방향을 지속적으로 제어

해야 한다. 만약 안테나 빔지향 제어가 정상적으로 이루어지지 않으면 레이더 플랫폼의 자세 변화 정도에 따라 수신된 신호의 전력이 감소하는 현상이 발생할 수 있다.

3.2 PRI 변경

SAR 영상 형성을 위한 신호처리는 레이더 펄스가 방사될 때 플랫폼 위치의 간격이 일정하다는 가정에서 출발한다. 만약 레이더 플랫폼의 진행방향 속도에 변화가 발생하면 PRI(pulse repetition interval)를 변경하여 펄스 방사 위치 간격이 일정하게 유지될 수 있도록 하는 과정이 필요하다. 이 과정에서 PRI 변경 단위의 해상도는 그림 4에서와 같이 SAR 영상 품질 요소인 PSLR과 ISLR에 영향을 미치게 되므로 SAR 성능 조건을 충분히 고려하여 PRI 변경 해상도들 결정하여야 한다.

3.3 거리 게이트 조정 및 위상 보상

레이더 플랫폼의 거리방향 위치 변화가 RCM(range curvature migration)과 방위방향 위상에 직접적인 영향으로 나타나기 때문에 수신 거리 게이트 조정과 위상 보상 과정을 통해 적절한 보상이 이루어져야 한다. 식 (9)에서 $2\Delta r(t)/c$ 는 거리방향 요동에 따른 수신 거리 게이트 조정값이고, $4f_c \Delta r(t)/c$ 는 위상 보상값에 해당한다.

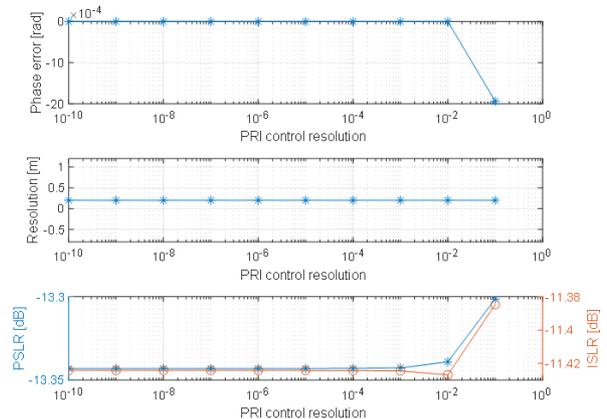


그림 4. PRI 변경 해상도에 따른 SAR 성능 영향
Fig. 4. Impact on SAR performance according to PRI control resolution.

IV. 실시간 요동보상 하드웨어/소프트웨어 설계

최근 항공용 SAR 시스템에서는 온보드 신호처리를 통해 SAR 영상을 실시간으로 생성한다. 따라서 항공용 SAR 시스템에서는 실시간 요동보상에 효과적인 하드웨어와 소프트웨어 구조가 필수적이다. 일반적인 레이더 시스템에서는 송신 타이밍이 CPI(coherent processing interval) 동안 고정되지만, 항공용 SAR 시스템에서는 요동 보상을 실시간으로 수행하기 위해 송수신 타이밍을 매 펄스마다 변경하게 된다.

4.1 레이더 타이밍 신호 발생기 하드웨어 설계

레이더 시스템은 타이밍 신호를 통해 레이더 송수신 장치의 펄스 송수신 구간을 제어한다. 그림 5는 실시간 요동보상이 가능한 레이더 타이밍 신호 발생기의 하드웨어 구조를 나타낸다. 레이더가 운용되기 전에 레이더 송수신 타이밍 신호 발생 로직에 송신 타이밍 파라미터 데이터와 수신 타이밍 파라미터 데이터가 각각 장입된다. 타이밍 파라미터 데이터는 그림 6과 같이 레이더 타이밍 신호의 타이밍 다이어그램을 시간대별로 샘플링하여 데이터 형태로 변환한 것이다. 타이밍 파라미터 데이터는

송수신 타이밍을 다양하게 생성하기에 효과적인 구조이다. 레이더 운용이 시작되면 실시간 요동보상 소프트웨어에서는 항법정보를 이용하여 현재 레이더 플랫폼의 위치를 추정하고 레이더 펄스 신호가 송수신되어야 하는 시간을 예측한다. 예측된 레이더 송수신 시점과 OBT(on-board timer)의 현재 시간과의 차이에 해당하는 PRI 카운트와 RGD (range gate delay) 카운트는 각각 PRI 카운터와 RGD 카운터에 저장된다. PRI 카운터의 카운트가 0이 되면 송신 타이밍 신호가 발생되고, RGD 카운터의 카운트가 0이 되는 순간에는 수신 타이밍 신호가 발생하는 구조이다.

레이더 송수신 타이밍 신호가 발생하는 과정은 그림 7의 타이밍 신호 제어 시퀀스 다이어그램에서와 같다. PRI 카운터의 카운트가 0이 되는 순간에 송신 활성화 신호가 송신 타이밍 신호 발생 로직으로 전달된다. 송신 타이밍 신호 발생 로직에서는 송신 타이밍 파라미터 데이터에 대응하는 송신 타이밍 신호를 chirp 발생기와 송신장치로 각각 발생시킨다. 수신 타이밍 신호도 동일한 방식으로 RGD 카운터의 카운트가 0이 되는 순간에 수신 활성화 신호가 수신 타이밍 신호 발생 로직으로 보내지고, 수신 타이밍 파라미터 데이터에 대응하는 수신 타이밍 신호가 수신장치, chirp 발생기, 기저대역처리기로 전달된다. 그리고 각 장치들은 송수신 타이밍 신호에 따라 레이더 펄

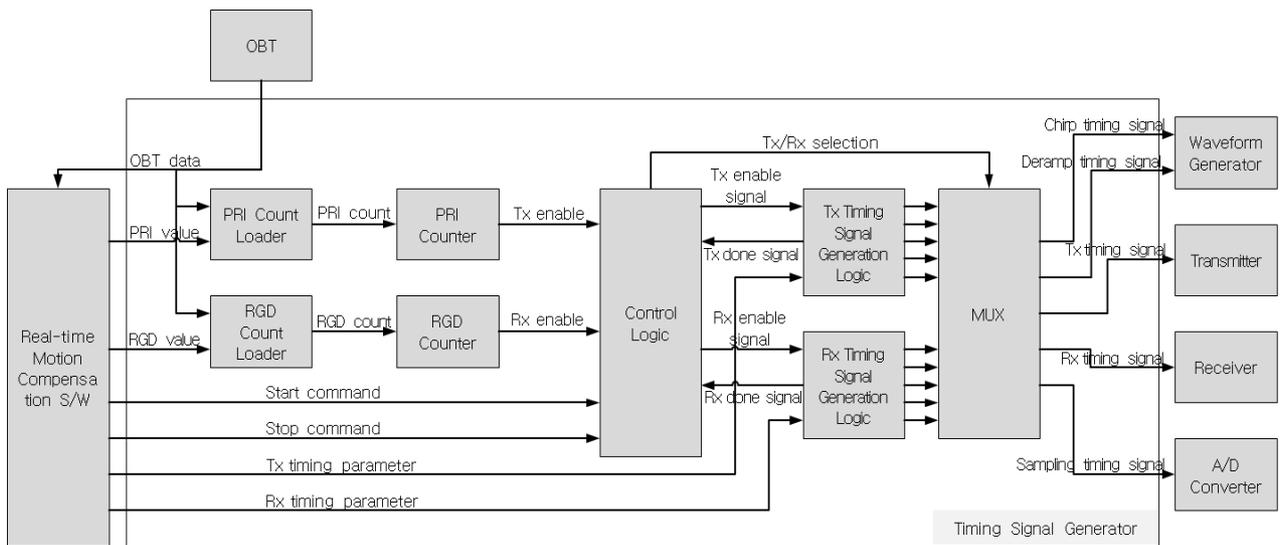


그림 5. 레이더 타이밍 신호 발생기 하드웨어 블록도
Fig. 5. H/W block diagram of the radar timing signal generator.

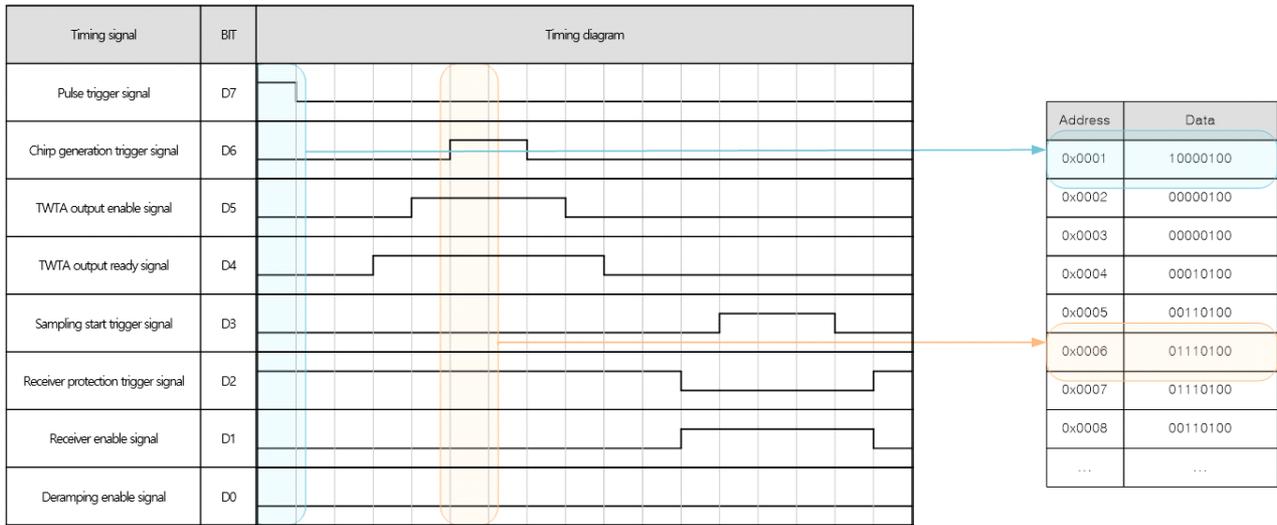


그림 6. 레이더 타이밍 파라미터 데이터
Fig. 6. Radar timing parameter data.

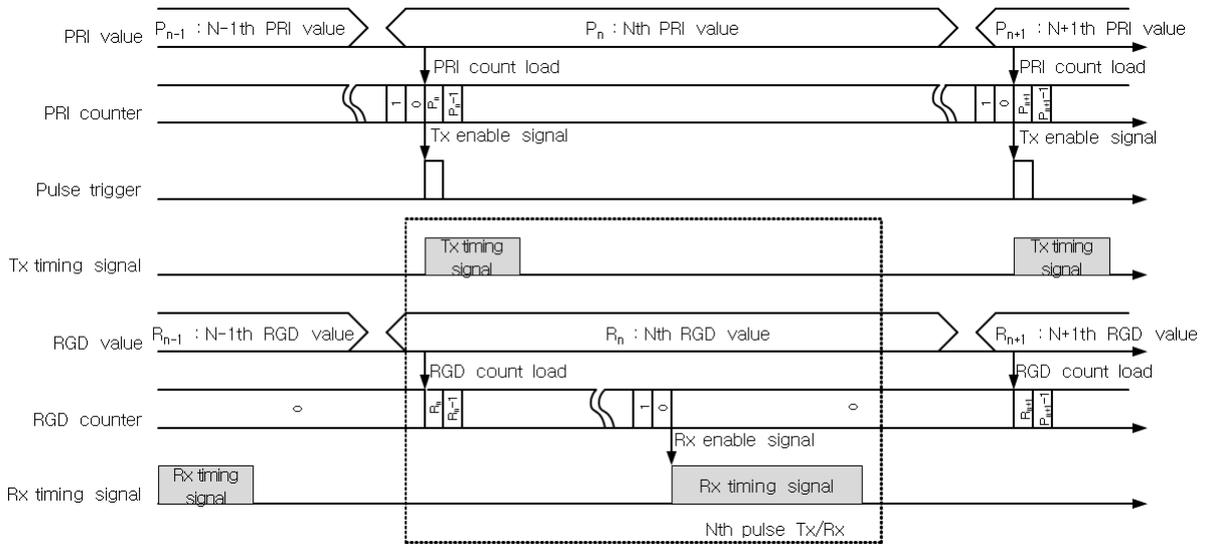


그림 7. 타이밍 신호 제어 시퀀스 다이어그램
Fig. 7. Timing signal control sequence diagram.

스의 송신과 수신 및 수신 신호의 샘플링 과정을 수행하게 된다.

4-2 실시간 요동보상 소프트웨어 설계

실시간 요동보상 소프트웨어는 항법장치로부터 획득된 레이더 플랫폼의 위치, 속도, 자세 정보를 이용하여 항

공기의 요동을 실시간으로 추정하여 레이더의 송수신 시점을 결정한다. 항법장치는 안테나에 바로 장착되거나, 안테나에 근접한 위치에 장착되어 안테나 레버암 효과가 최소화될 수 있어야 한다.

그림 8은 실시간 요동보상 소프트웨어 동작에 대한 기능 블록도를 나타낸다. 타이밍 생성 모듈 하드웨어에서

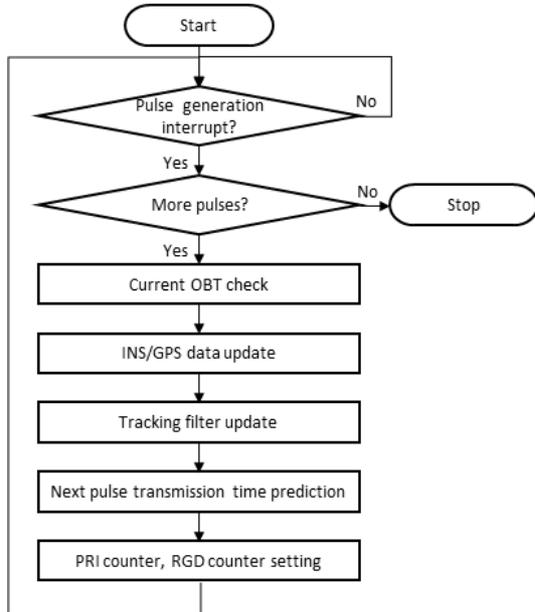


그림 8. 실시간 요동보상 소프트웨어 기능 블록도
Fig. 8. Functional block diagram of the real-time motion compensation S/W.

레이다 펄스 방사 완료에 대한 인터럽트가 발생되면 실시간 요동보상 소프트웨어에서는 마지막 펄스 여부를 확인한다. 마지막 레이다 펄스가 아닌 경우에는 현재 OBT 시간과 항법장치의 데이터 갱신을 확인하고, 추적 필터를 업데이트한다. 업데이트된 추적 필터의 위치 및 속도 정보를 사용하여 차기 레이다 펄스의 방사 시점을 계산하고 해당 시점에 송/수신 타이밍 신호를 발생시키기 위해 PRI 카운트와 RGD 카운트를 타이밍 생성 모듈 하드웨어에 설정한다.

4.3 요동 예측 알고리즘 설계

실시간 요동보상 소프트웨어의 성능에 결정적인 영향을 미치는 요동 예측 알고리즘은 레이다 플랫폼의 속도를 적분하여 위치를 추정하는 방식에 기반을 둔다. 요동 예측 오차는 SAR 수신신호의 위상 오차로 발생한다. 이러한 위상 오차 중에서 2차항까지는 SAR 영상형성 이후 자동초점(autofocus) 기법을 통해 보상이 가능하지만, 일반적으로 3차항 이상의 위상 오차는 보상이 어려워지는 경향이 있다.

GPS/INS 강결합 방식의 항법장치는 출력된 위치 정보에 그림 9에서와 같이 GPS 보정에 의한 GPS jumping 현상이 발생한다^[9]. 이런 GPS jumping 현상은 SAR 시스템에서는 3차항 이상의 위상 오차로 나타난다. 반면에 항법장치의 속도 정보에는 GPS jumping 현상이 발생하지 않기 때문에 속도 정보를 적분하여 레이다 플랫폼의 위치를 추정하는 방식이 SAR 신호처리 관점에서는 더욱 효과적인 방식이라 할 수 있다.

레이다 펄스의 송수신 시점 제어에 필요한 요동 예측을 위해서는 추적필터가 필요하다. 일반적으로 항공용 SAR 시스템의 플랫폼은 등속 직선운동을 목표로 비행조정이 이루어지기 때문에 기동이 심하지는 않다. 따라서 일반적인 smoothing filter 형태의 추적필터가 적합하다. 본 논문에서는 실시간성과 계산량을 고려하여 추적필터로 g-h-k filter를 이용한다. 식 (10)~식 (12)는 g-h-k update equation으로 각각 위치, 속도 가속도에 대한 update equation이다^[10]. 식 (13)~식 (15)는 최소자승기법 관점에서 최적화된 g-h-k filter 파라미터이다. 여기서 θ 는 추적필터에 측정치 반영 정도를 결정하는 smoothing factor로 0에서부터 1사이의 값을 가지게 되는데, θ 가 0인 경우에는 g-h-k update equation에 측정치만 반영되고, 1인 경우에는 예측치만 반영되는 방식이다. n 번째 펄스 방사 시점에서의 레이다 플랫폼 진행방향 위치 측정치 $x_{meas,n}$ 은 항

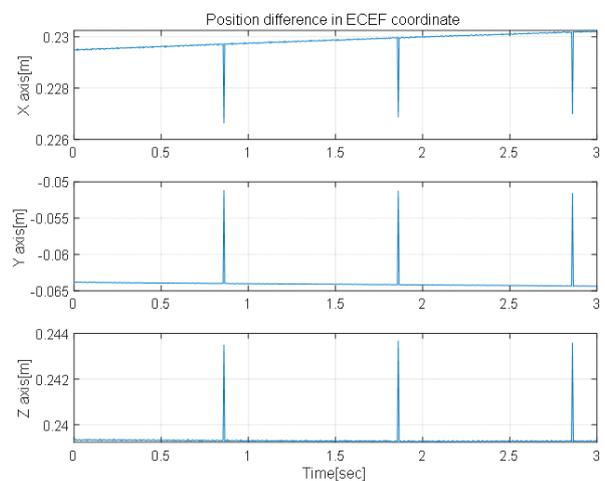


그림 9. GPS jumping
Fig. 9. GPS jumping.

법장치의 속도 성분을 적분한 값을 사용한다.

$$x_{n|n}^* = x_{n|n-1}^* + g(x_{meas,n} - x_{n|n-1}^*) \quad (10)$$

$$\dot{x}_{n|n}^* = \dot{x}_{n|n-1}^* + \frac{h}{T_{PRI,n}}(x_{meas,n} - x_{n|n-1}^*) \quad (11)$$

$$\ddot{x}_{n|n}^* = \ddot{x}_{n|n-1}^* + \frac{2k}{T_{PRI,n}^2}(x_{meas,n} - x_{n|n-1}^*) \quad (12)$$

$$g = 1 - \theta^3 \quad (13)$$

$$h = 1.5(1 - \theta^2)(1 - \theta) \quad (14)$$

$$k = 0.5(1 - \theta)^3 \quad (15)$$

그리고 식 (16)~식 (18)은 g-h-k prediction equation으로 다음 번 펄스의 방사 시점을 결정하기 위해 식 (16)을 이용하여 $n+1$ -번째 펄스의 PRI($T_{PRI,n+1}$)를 구한다. 이 때 $x_{n+1|n}^*$ 은 $n+1$ -번째 펄스가 방사되어야 하는 진행방향의 위치이다. 그리고 $n+1$ -번째 펄스 방사 시점에서의 레이더 플랫폼의 거리방향 위치 $y_{n+1|n}^*$ 과 수직방향 위치 $z_{n+1|n}^*$ 은 식 (16)과 동일한 방식으로 예측할 수 있다.

$$x_{n+1|n}^* = x_{n|n}^* + \dot{x}_{n|n}^* T_{PRI,n+1} + \ddot{x}_{n|n}^* \frac{T_{PRI,n+1}^2}{2} \quad (16)$$

$$\dot{x}_{n+1|n}^* = \dot{x}_{n|n}^* + \ddot{x}_{n|n}^* T_{PRI,n+1} \quad (17)$$

$$\ddot{x}_{n+1|n}^* = \ddot{x}_{n|n}^* \quad (18)$$

일반적으로 항법장치는 레이더 플랫폼의 중심에 위치하게 되고, 그림 10과 같이 레이더 안테나 위상 중심과 항법장치의 중심은 일치하지 않게 된다. 따라서 항법장치 중심에서 예측된 레이더 플랫폼의 요동은 안테나 위상 중심에서의 요동으로 변환되어야 한다. 식 (19)와 식 (20)은 항법장치 중심을 기준으로 레이더 안테나 위상 중심의 위치를 나타내는 수식이다. 그림 10에서와 같이 항법장치 중심에서 안테나 고각 회전축까지의 벡터는 고정된 값이지만, 안테나 고각 회전축에서 안테나 평면까지의 벡터는 안테나의 방위각과 고각에 따라 변하게 된다. 식 (20)에서 r 은 안테나 고각 회전축에서 안테나 평면까지의 거리이고, θ 와 ϕ 는 각각 안테나 고각 방향과 방위각 방향

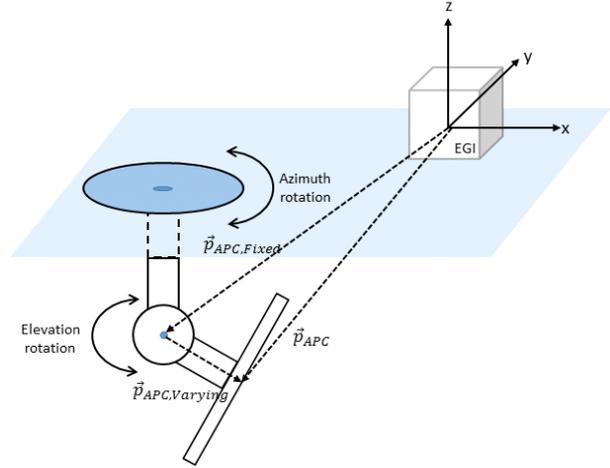


그림 10. 안테나 레버 암
Fig. 10. Antenna lever arm.

으로의 회전각도이다.

$$\vec{p}_{APC} = \vec{p}_{APC, Fixed} + \vec{p}_{APC, Varying} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_{APC} \\ y_{APC} \\ z_{APC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{APC, Fixed} \\ y_{APC, Fixed} \\ z_{APC, Fixed} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r \cos \theta \cos \phi \\ r \cos \theta \sin \phi \\ r \sin \theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

예측된 PRI와 안테나 위상 중심 위치 정보는 실시간 요동보상 소프트웨어에서 송수신 타이밍을 제어하기 위한 PRI 카운트와 RGD 카운트를 결정하는 데 사용된다. PRI 카운트는 식 (21)과 같이 해당 PRI를 시스템 클럭의 주기로 나눈 정수값이다. 그리고 RGD 카운트는 식 (22)와 같이 계획경로에 해당하는 RGD 카운트에 거리방향 요동 Δr 에 의한 RGD 조정값을 더하여 얻는다. 여기서 거리방향 요동 Δr 에 의한 RGD 조정값은 Δr 에 해당하는 시간 지연을 시스템 클럭의 주기로 나눈 정수값이다.

$$PRI\ Count = \text{int} \left(\frac{T_{PRI}}{Period_{system\ clock}} \right) \quad (21)$$

$$RGD\ Count = RGD\ Count_{nominal} + \text{int} \left(\frac{2\Delta r/c}{Period_{system\ clock}} \right) \quad (22)$$

V. 탑재비행시험 결과

본 논문에서 제안한 항공용 SAR 시스템의 실시간 요

동보상 방식에 대한 검증은 민간 항공기를 이용한 탑재 비행시험을 통해 수행되었다^{24,3)}. 표 1은 탑재비행시험에 사용된 주요한 SAR 시스템 파라미터들이다.

그림 11은 탑재비행시험에서 실제 발생한 요동의 경향성을 보여준다. 65초 정도의 SAR 임무 운용 시간 동안 진행방향으로는 대략 2 m/s 정도의 속도 변화가 발생하고, 수평/수직방향으로는 수십 미터 내외의 요동이 확인된다. 이러한 요동 조건 상황에서 실시간 요동보상의 적용 여부가 SAR 영상 형성에 어떤 영향을 미치는지를 그림 12

표 1. 비행시험 SAR 시스템 파라미터

Table 1. SAR system parameters of the flight test.

| Parameter | Unit | Value |
|-------------------|------|--------|
| Height | m | 3,000 |
| Platform velocity | m/s | 60 |
| Slant range | m | 15,000 |
| SAL | m | 248.13 |

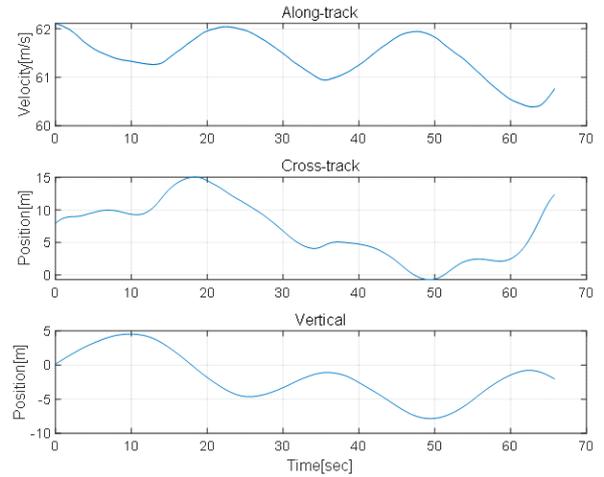
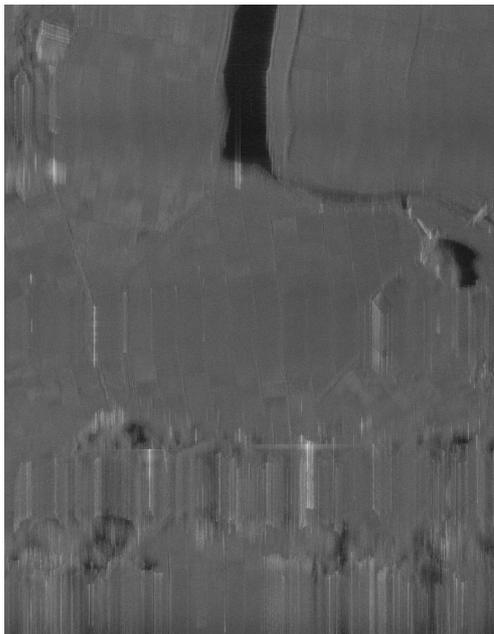


그림 11. 탑재비행시험 요동

Fig. 11. Motion in the captive flight test.

의 시험 결과를 통해 확인할 수 있다. 실시간 요동보상을 적용하지 않은 결과에서는 방위방향 압축이 이루어지지 않고 SAR 영상의 초점이 전혀 맞지 않음을 알 수 있다.



(a) 실시간 요동보상 전
(a) Before real-time motion compensation



(b) 실시간 요동보상 후
(b) After real-time motion compensation

그림 12. 탑재비행시험 결과

Fig. 12. Test result of the captive flight.

반면에 실시간 요동보상이 적용된 시험 결과에서는 자동 초점 기법이 적용되지 않은 영상임에도 불구하고 방위방향 초점이 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 실시간 요동보상이 적용된 SAR 영상에서 자동초점 기법이 적용된다면 요동 예측 오차로 인해 발생하는 위상 오차를 추가로 제거할 수 있으므로 SAR 영상의 부엽 특성을 좀 더 개선할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 항공용 SAR 시스템에 실시간 요동보상 기능 적용을 위한 효과적인 하드웨어 및 소프트웨어 설계 방식에 대해 제안하였다. 또한 실시간 요동보상을 위한 효율적인 안테나 위상 중심 예측 알고리즘도 함께 제안하였다. 제안된 방식의 실시간 요동보상 성능은 민간 항공기를 이용한 탑재비행시험을 통해 검증하였다. 탑재비행시험 결과를 통해 항공용 SAR 시스템에서 실시간으로 고해상 SAR 영상을 획득하기 위해서는 실시간 요동보상 기능이 필수임을 확인할 수 있었다.

References

[1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Norwood, MA, Artech House, pp. 113-168, 2005.

[2] H. I. Shin, K. I. Kwon, S. H. Yoon, H. S. Kim, J. Hwang, and Y. C. Ko, et al, "SAR test-bed to acquire raw data and form real-time image," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 181-186, Apr. 2017.

[3] J. Hwang, Y. C. Ko, S. Y. Kim, K. I. Kwon, S. H. Yoon, and H. S. Kim, et al, "A study on spotlight SAR

image formation by using motion measurement results of CDGPS," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 166-172, Apr. 2018.

[4] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA, Artech House, pp. 13-80, 1995.

[5] S. Theodoridis, R. Chellappa, F. Gini, and N. D. Sidiropoulos, *Academic Press Library in Signal Processing: Communications and Radar Signal Processing*, Kidlington, Academic Press, pp. 918-925, 2014.

[6] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, "Motion compensation errors: Effects on the accuracy of airborne SAR images," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1338-1352, Oct. 2005.

[7] G. E. Haslam, A. Damini, "Specifying the allowable latencies in the application of SAR motion corrections," in *EUSAR '96, European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Königswinter, Mar. 1996, pp. 403-406.

[8] D. H. Kim, S. H. Park, and K. T. Kim, "SAR motion compensation using GPS/IMU," *The Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 1, pp. 16-23, Jan. 2011.

[9] H. Lee, C. S. Jung, and K. W. Kim, "A position estimation technique for motion compensation of synthetic aperture radar," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 18, no. 5, pp. 65-75, May 2020.

[10] E. Brookner, *Tracking and Kalman Filtering Made Easy*, New York, NY, John Willey & Sons, pp. 3-63, 1998.

김 형 석 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8193-1736>



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] SAR 시스템, SAR 요동보상

윤 상 호 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5557-6582>



1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2004년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2004년~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 레이더/SAR 시스템 및 신호처리

황 정 훈 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4768-8642>



2003년 2월: 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2020년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
2005년~현재:국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 체계 설계