

위성 탑재 영상레이다 스퀀트 운용을 위한 가변 PRF 적용 설계

이호창*, 이아림**¹, 차경현**², 성진봉**³

PRF Variation Scheme Design for Spaceborne SAR Squint Operation

Hochang Lee*, Arim Lee**¹, Kyunghyun Cha**², and Jinbong Sung**³

본 연구는 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (925017305)

요약

위성 탑재 영상레이다(SAR)는 지표면 반사 신호를 기반으로 영상 정보를 획득하는 장비이다. 기존 영상 레이더는 위성 진행 방향의 좌우 직하 위치 영상을 획득하는 브로드사이드 모드로 운용되었다. 그러나 더 높은 해상도의 영상 획득과 위성 진행 방향으로부터 멀리 떨어진 지역의 영상 획득을 위해서는 스퀀트 운용이 필요하다. 스퀀트 운용 시 도플러 주파수 변화가 커지므로, 신호의 중첩 문제를 해결하기 위해 영상 레이더의 PRF가 가변적으로 조정되어야 한다. 하지만 기존의 브로드사이드 기반 모드만 운용하던 영상 레이더는 가변 PRF 적용에 한계가 있었다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 가변 PRF 기반 운용이 가능한 제어 소프트웨어 설계 방안을 제안한다. 또한, 제안한 설계 사항을 제어소프트웨어에 구현하고, 이를 하드웨어에 적용하여 PRF 가변 기능이 정상적으로 동작함을 검증하였다.

Abstract

Spaceborn Synthetic Aperture Radar (SAR) is a system that acquires image data based on ground reflection signals. Traditional SAR systems operate in broadside mode, image acquisition perpendicular sides of the satellite's path. However, for improved image resolution and the ability to acquire images from areas farther from the satellite's trajectory, squint mode operation is required. In squint mode, the Doppler frequency variation increases significantly, necessitating a variable Pulse Repetition Frequency (PRF) to resolve signal overlap issues. However, conventional broadside-mode SAR systems have limitations in implementing variable PRF. This paper presents a SAR control software design that enables variable PRF operation to overcome these limitations. The proposed design was implemented in real control software and integrated into hardware to verify the proper functioning of PRF variation.

Keywords

spaceborn SAR, PRF variation, squint operation, timing adjustment

* 국방과학연구소 연구원(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1463-5483>
** 국방과학연구소 연구원
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-9931-9921>
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0008-6666-8464>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-5028-0990>

· Received: Apr. 02, 2025, Revised: Apr. 30, 2025, Accepted: May 03, 2025
· Corresponding authors: Hochang Lee
Defense Space Technology Center, Agency for Defense Development,
Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, 34186, Korea
Tel.: +82-42-821-0632, Email: hclee0126@add.re.kr

1. 서 론

위성 탑재 영상레이더는 지구 저궤도(500~500km) 상공에서 지구를 공전하며, 사용자의 촬영 요청에 따라 레이더 신호를 송신하고, 지표면에서 반사된 신호를 기반으로 영상데이터를 획득하는 시스템이다[1]. 우주 공간에서 임무를 수행하기 때문에 시간과 공간의 제약 없이 운용할 수 있다는 장점을 가지며, 금속 재질에 대한 반응도가 높아 민간(자원 탐사, 지표 변화 감시) 및 군사(군사 표적 식별) 용도로 활발히 연구 및 개발되고 있다[2].

위성 탑재 영상레이더는 다양한 임무 요구사항을 충족하기 위해 그림 1과 같이 다양한 운용 모드를 지원한다. 이 중 고해상도 영상 획득 모드에서는 레이더의 특성상 특정 지점을 가능한 한 오랫동안 지향하며 신호를 획득해야 한다. 이를 위해 전자적으로 빔을 조향하거나, 위성체의 기동을 통해 기계적으로 조향을 유지하는 기법을 적용한다. 통상의 경우, 좌우 대칭을 유지하면서 위성 진행 방향에 수직으로 영상을 획득하는 브로드사이드 모드로 운용된다.

하지만 보다 높은 해상도와 향상된 관측 성능을 확보하거나, 위성 진행 방향에서 멀리 떨어진 특정 지점 관측, 이동 물체 탐지 및 전자전 대응과 같은 목적을 달성하기 위해서는 위성이 전방 또는 후방으로 기울어진 상태에서 운용이 필요할 수 있다. 이

러한 운용 방식을 스캔트(Squint) 운용이라고 한다(그림 2).

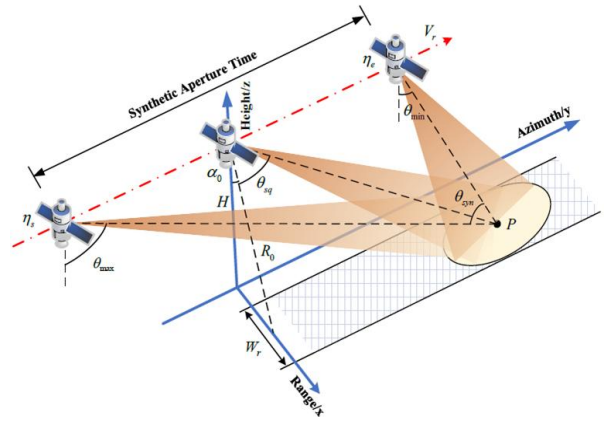


그림 2. [2]에서 소개된 스캔트 모드운용 동작 개념
Fig. 2. Squint mode operation concept at [2]

브로드사이드 운용 방식에서는 영상 획득을 위해 지표면에 레이더 신호를 송출할 때 사용하는 PRF (Pulse Repetition Frequency)는 고정된 값을 사용한다. 즉, 하나의 영상 획득을 위한 수 초간의 운용 동안 같은 PRF 주기로 신호를 송신 및 수신한다. 그러나 스캔트 운용에서는 레이더 신호가 특정 각도로 기울어져 송출되므로 도플러 주파수 변화가 커지며, 신호 간 중첩(에일리어싱) 등의 문제가 발생할 수 있다. 이는 곧 영상 생성 시 품질 저하로 이어질 수 있다.

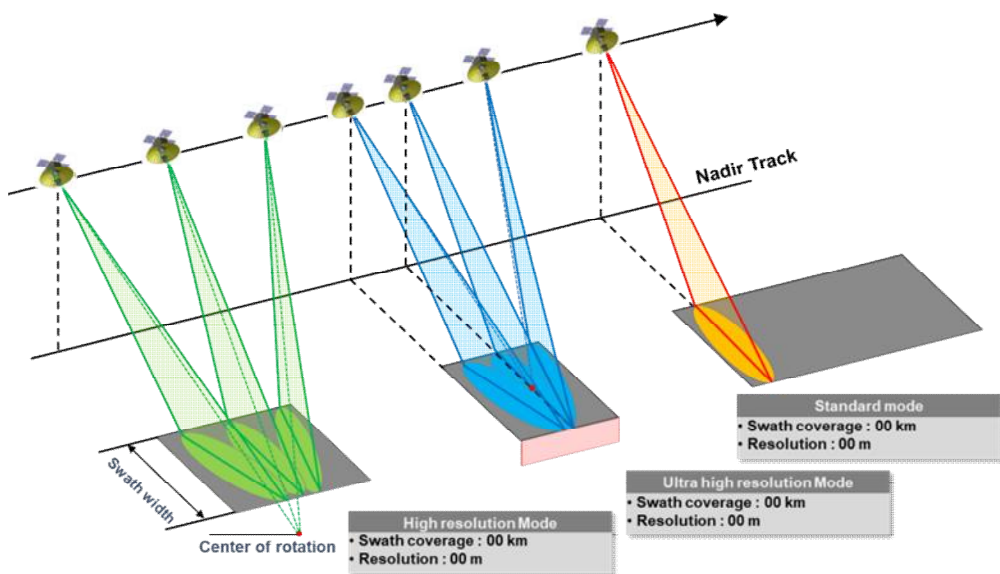


그림 1. 브로드사이드 기반의 위성 SAR 운용모드
Fig. 1. Various SAR operation mode broadside

따라서 스윕트 운용에서는 운용 중간에 적절한 PRF 조정이 필수적이며, 이를 통해 최적의 SAR (Synthetic Aperture Radar) 영상 품질과 신뢰성을 확보할 수 있다.

본 논문에서는 기존 시스템을 기반으로 가변 PRF 적용을 위한 제어 소프트웨어 설계 방안을 제시한다. 이를 위해 다음 세 가지 주요 설계 변경 부분을 식별하였다.

1. 가변 PRF 정보를 어떤 형태로 위성 탑재 제어 소프트웨어에 전송할 것인지에 대한 방안

2. 가변 PRF 정보를 레이더 운용 타이밍 설계에 어떻게 반영하여 적용할 것인지에 대한 방안

3. 가변 PRF 적용 여부를 지상에서 확인하기 위해 어떤 정보를 어떻게 전송할 것인지에 대한 방안

각 항목에 대한 설계 사항을 논문 3장에 기술하였으며, 해당 설계 사항을 제어소프트웨어에 구현하고 시험을 시행하여 가변 PRF 기반의 정상 동작 여부를 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존 위성 탑재 영상레이더 연구 동향 및 위성들의 타이밍 설계 방법을 소개한다. 3장에서는 제안된 스윕트 운용을 위한 가변 PRF 기반 제어 소프트웨어 설계 방안을 제시한다. 4장에서는 본 설계를 적용한 제어 소프트웨어 기반 장치의 시험 결과 및 분석 내용을 다룬다. 마지막으로, 5장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 관련 연구

위성 탑재 영상레이더 기술은 해상도 향상, 광대역 촬영 모드 운용, 초고속 데이터 전송 등의 방향으로 지속해서 발전하고 있으며, 최근에는 인공지능 및 머신러닝을 활용한 SAR 영상 분석 연구도 활발하게 진행되고 있다[3]. 특히, 기존의 중·대형 위성을 활용한 정밀 영상 촬영 연구에서 소형 위성을 활용한 군집 SAR 시스템으로 연구가 확장되고 있다. 이러한 소형 위성 SAR 시스템은 비용 절감과 함께 다양한 관측 각도를 제공할 수 있어 더욱 유연한 운용이 가능하다[4][5].

이러한 연구 흐름 속에서 위성 탑재 영상레이더 시스템의 운용 방식도 점차 발전하고 있으며, 그중

하나가 스윕트 운용 방식이다. 스윕트 모드는 특정 지역을 보다 효과적으로 관측할 수 있도록 빔 조향 또는 플랫폼 기동을 통해 최적화된 각도로 촬영하는 방식이다. 정해진 위성 운용 궤도에서 스윕트 모드를 활용하면 빔 조향을 통해 원하는 지역을 자유롭게 촬영할 수 있어 특정 지역을 지속해서 추적하거나 넓은 지역을 신속하게 촬영하는 데 유리하다 [6][7]. 최근에는 능동 위상 배열 안테나(Active phased array antenna) 기술의 발전으로 자유로운 빔 조향이 가능해졌다. 능동 위상 배열 안테나를 활용하면 빔을 전자적으로 제어하여 스윕트 각도를 실시간으로 조정할 수 있으며, 이를 통해 SAR 시스템의 활용도가 더욱 높아지고 있다.

이러한 이유로 최근 위성 탑재 영상레이더 시스템에서는 스윕트 운용을 적극적으로 도입하고 있으며, 이를 위한 신호 처리 및 타이밍 조절 기법이 중요한 연구 과제로 떠오르고 있다. 특히, 스윕트 모드에서는 도플러 중심 주파수 변화와 신호 시간 지연 등의 영향으로 인해 SAR 시스템의 정밀한 타이밍 조절이 필수적이다.

최근 연구에서는 스윕트 SAR의 주로 신호 처리 알고리즘에 초점을 맞추고 있으며, 도플러 주파수 변화로 인한 해상도 저하 문제를 해결하기 위해 적응형 필터링(Adaptive filtering) 및 주파수 보정 알고리즘이 개발되고 있다. 해당 기법은 도플러 주파수 변동을 효과적으로 보정하고, 신호 변화에 적응적으로 대응할 수 있으나 변화가 매우 급격할 경우 우 보정 알고리즘의 성능저하가 일어날 수 있으며, 고도의 연산 능력을 요구하므로 실시간 적용 시 비용 부담과 처리 지연 문제가 발생할 수 있다. 또한, 신호 지연 및 위상 왜곡을 최소화하기 위한 고급 보정 기법이 연구되고 있으며, 정밀한 타이밍 동기화를 위해 위성 내부의 클럭 안정성 향상 기법과 외부 GPS 신호를 활용한 보정 방법이 제안되고 있다[8]-[10]. 클럭 안정성 향상 기본적으로 시간 정밀도를 증가시켜, 시스템 전체의 신뢰성 및 정확도를 높이나 위성 내부의 하드웨어 개선이나 고성능 클럭 소자의 사용으로 인해 제작 비용 및 복잡성이 증가한다. 외부 GPS 신호를 사용하면 위성 자체 클럭에 내재된 장기적 오차 누적 문제를 효과적으로 완화할 수 있으나 우주 환경에서 수신 상태가 불안정해질 경우 일시적인 신호

손실이나 오차가 발생할 수 있다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구는 기존 신호 처리 알고리즘 및 하드웨어 연구들과 차별화하여 복잡성 및 제작 비용 증가 없이 적용 가능한 모드 파라미터에 입력되는 PRF 값을 가변적으로 조정하는 소프트웨어를 제안한다. 또한 이에 따른 설계 사항과 실험 및 분석 결과를 제시한다.

III. 스캔트 운용을 위한 제어소프트웨어 설계

위성 탑재 영상레이더는 여러 개의 복잡한 장비로 구성되어 있으며, 정밀한 타이밍을 기반으로 각 장치를 제어하여 영상데이터를 획득한다. 제어소프트웨어는 지상으로부터 운용 명령을 수신하고, 해당 명령을 기준으로 각 하드웨어의 동작을 제어하며, 획득된 영상데이터를 지상으로 전송하는 임무를 수행한다. SAR 운용을 위한 제어소프트웨어의 업무 수행 과정을 단순화하면 다음과 같다.

[과정 1] 원하는 촬영 지점에 대한 운용 파라미터를 생성하고, 이를 바탕으로 운용 명령을 생성

[과정 2] 지상국과 교신 시점에 앞서 생성된 운용 명령을 위성으로 전송

[과정 3] 전송된 운용 명령 기반으로 제어소프트웨어는 촬영을 위한 제반 데이터(타이밍 구조 등) 준비

[과정 4] 촬영 시점이 되면, 준비된 제반 데이터를 기반으로 영상레이더 하드웨어를 제어하여 PRI 단위로 영상데이터 획득

[과정 5] 지상국 교신 시점에 획득된 영상데이터 및 부수 정보(Ancillary Data)를 전송 (영상 생성은 해당 데이터를 기반으로 지상에서 수행)

위 과정 중 스캔트 운용을 위해 보완이 필요한 부분은 <[과정 1], [과정 3], [과정 5]>이다. 따라서 본 논문에서는 변경이 필요한 세 부분에 대한 설계 및 개발 내용을 정리하였다.

3.1 가변 PRF 적용을 위한 운용 변수 설계

가변 PRF를 적용하기 위해 제어소프트웨어가 운용 중 어느 시점에 어떤 PRF 값을 사용할지를 사

전에 인지해야 한다. 다양한 스캔트 운용 각 및 고도에 따라 매번 다른 PRF(Pulse Repetition Interval: 1/PRF) 값이 적용될 수 있으며, 변경 횟수 또한 고정하여 운용할 수 없다.

본 연구에서는 이러한 다양성을 반영할 수 있도록 매 촬영에서 가변 될 PRF 변화를 다항식으로 표현하고, 해당 다항식의 계수 값을 전송하는 방식을 설계하였다. 다항식의 차수를 높게 구성하면 보다 정교한 PRI 변화 값을 도출할 수 있다. 하지만 그에 따라 다항식 계수 값이 많아지므로, 지상에서 위성으로 올리는 운용 명령 크기가 증가한다. 현재의 성능 분석 결과로는 3차항 정도로도 충분히 성능을 만족하는 가변 PRF 정보를 생성할 수 있다. 하지만 향후 확장성을 고려하여 본 시스템에서는 8차 다항식으로 구성하였다. 이는 현재 사용하는 운용 명령의 공간에 충분한 여유가 있기에 가능하였다. 본 연구에서 적용한 다항식은 식 (1) 과 같다. 여기서 N은 영상 레이더 운용 중 빔 조향 등을 고려한 운용 구간 반복 횟수를 나타내며, PRI STEP은 PRI 변경 횟수를 나타낸다. 그리고 각 반복 횟수마다 PRF 값을 가변할 수 있다. $PRI_{AD0} \sim PRI_{AD8}$ 은 다항식의 계수 값으로, 지상에서 부동소수점(Float) 값을 IEEE 754 포맷으로 변환하여 위성으로 전송된다. 지상으로부터 수신한 다항식 계수 및 단계 설정 변수를 기반으로 ΔPRI 이 계산되며, 운용 중 반복 구간(1~N)에 적용될 PRI_{VAL} 은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\Delta PRI = PRI_{AD0} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right] PRI_{AD1} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^2 PRI_{AD2} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^3 PRI_{AD3} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^4 PRI_{AD4} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^5 PRI_{AD5} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^6 PRI_{AD6} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^7 PRI_{AD7} + \left[i - \frac{(N+1)}{2} \right]^8 PRI_{AD8}$$

$$i = 1 : N \quad step : \left[\frac{N}{PRI \text{ STEP}} \right] \quad (1)$$

$$PRI_{VAL} = PRI + \Delta PRI(i) \quad (2)$$

위 계산을 수행하기 위해 지상에서 추가로 전송해야 할 변수는 그림 3의 파란색 글자로 표시한 변수이며 이에 대한 설명은 표 1과 같다. 각 변수는 4바이트가 할당되어 지상에서 임무 요청을 위한 운용 명령은 36바이트가 증가하였다.

WORD Counter	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0																
1	PUS Packet Header																															
...																																
5																																
6																	IMAGE_ID (MSW)															
7																	IMAGE_ID (LSW)															
...	...																															
10	PULSE LENGTH (MSW)																															
11	PULSE LENGTH (LSW)																															
...	...																															
57	PRI																															
58	IMA_LEN (=N)																															
59	SAMPLING_LENGTH (MSW)																															
60	SAMPLING_LENGTH (LSW)																															
...	...																															
66	PRI_ADJ_0																															
65	PRI_ADJ_1																															
68	PRI_ADJ_2																															
69	PRI_ADJ_3																															
70	PRI_ADJ_4																															
71	PRI_ADJ_5																															
72	PRI_ADJ_6																															
73	PRI_ADJ_7																															
74	PRI_ADJ_8																															
75	PRI_ADJ_9																															
76	PRI_ADJ_10																															
77	PRI_ADJ_11																															
78	PRI_ADJ_12																															
79	PRI_ADJ_13																															
80	PRI_ADJ_14																															
81	PRI_ADJ_15																															
82	PRI_ADJ_16																															
83	PRI_ADJ_17																															
84	CRC-16																															

그림 3. 운용 명령 구조
Fig. 3. Operation TC format

표 1. 가변 PRF 관련 변수
Table 1. Variable related to PRF variation

Parameter	Description	Note
IMA_LEN	Iteration count during echo acquisition step	N
PRI	Minimum PRI value in this operation mode	# of Tick based on system clock
PRI_STEP	PRI update times	New parameter
PRI_ADJ ₀	Polynomial coefficient(0)	
PRI_ADJ ₁	Polynomial coefficient(1)	
...	...	
PRI_ADJ ₈	Polynomial coefficient(8)	

3.2 가변 PRF 동작을 위한 타이밍 구조

영상 촬영 임무가 시작되면, 영상 레이더는 사전에 정의된 운용 타임라인에 따라 신호 송·수신 및 안테나 실시간 제어를 수행한다. 이러한 모든 과정은 정확한 동기화에 맞춰 진행되어야 하므로, 고속 클럭 기반의 타이밍 신호 정보를 구성하여 이를 제어한다. 위성 탑재 영상레이더는 임무 및 장치의 복잡도에 따라 다양한 타이밍 신호를 활용하며, 복잡한 제어를 수행한다. 본 논문에서는 이러한 개념을 간략화하여 소개하고자 5개의 주요 타이밍 신호를 기반으로 동작 개념과 알고리즘 적용 방법을 그림 4와 같이 설명한다. 사용된 5개의 타이밍 신호는 각각 하나의 PRI 내에서 특정 행위 제어에 사용된다. 예를 들어 PULSE_EN 신호는 제어장치가 Chirp 송신 신호 송출하는 시점에만 활성화하며 TX_GATE 신호는 생성된 송신 신호가 안테나를 통해 방사되는 시점에만 활성화된다. 보다 자세한 사항은 [11]을 참고하면 된다. 이처럼 전체 운용 구간 동안 특정 장치의 동작을 제어하기 위해 영상 레이더 내부에서는 정교한 클럭 신호를 기반으로 업무 수행과 동기화가 이루어진다. 이를 보다 효율적으로 관리하기 위해, 제어소프트웨어는 각 신호의 활성화(1) 및 비활성화(0) 상태를 이진값으로 표현하고, 각 행위의 지속시간(Duration)을 클럭의 Tick 수를 기준으로 기록한다. 이후, 해당 데이터 구조 정보를 활용하여 장치를 제어한다. 본 논문에서는 이러한 방식으로 운용되는 기존의 영상 레이더에서, 특정 시간마다 PRI 길이가 변경되는 가변 PRF를 적용을 위한 추가 설계 방안을 제안한다.

먼저, 1 PRI 구간 내에서는 레이더 송·수신을 정밀하게 제어하기 위한 각 패턴의 지속시간은 모드 설계 기반의 지상에서 전송된 운용 변수(P1~P4)와 각 장치의 안정성을 보장하기 위한 가드 타임(G1~G6)을 기반으로 구성된다. 본 연구에서 제안하는 가변 PRF가 적용되더라도 모드 설계에 기반한 정확한 송신/수신 기능의 정상적인 동작과 장치의 안전성을 보장하기 위해 최소한의 가드 타임 값은 변경되면 안 된다.

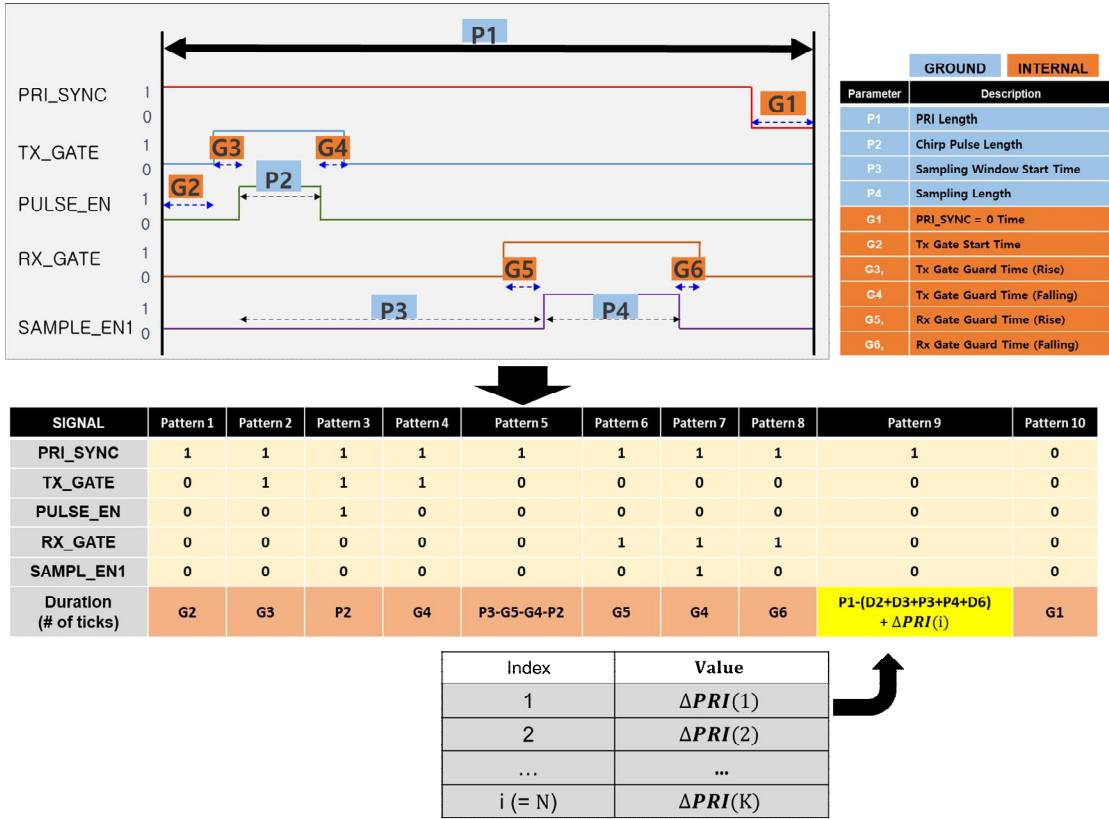


그림 4. 기존의 제어장치 타이밍 제어 기법 및 가변 PRF 적용을 위한 구간 식별 및 적용 방법
 Fig. 4. Previous SAR controller timing control method and proposed method for PRF variation implementation

이를 위해 각 구간(Pattern) 중 위 제약조건과 무관한 패턴 구간을 식별하고, 해당 구간의 지속시간에 앞서 계산된 ΔPRI 값을 운용 구간 반복 횟수(N)에 따라 더하여 주었다. 그림 4를 예로 보았을 때, 패턴 9가 다른 변수에 기반한 각 동작 이후의 잔여 시간 동안 지속되는 구간으로 가변 PRF 값을 적용하기에 적합하다.

이러한 구조를 바탕으로 영상 레이더는 그림 5와 같이 반복 횟수(i)에 따라 변경된 PRI_{Vd} 값이 적용될 수 있도록 설계되었다.

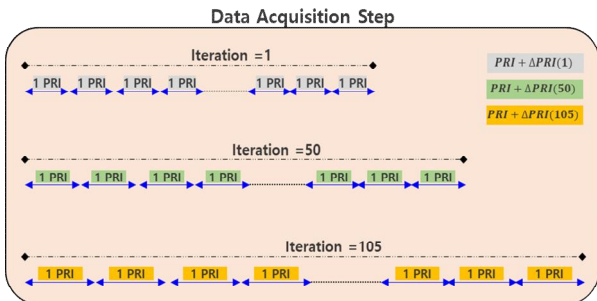


그림 5. 반복 횟수에 따른 1 PRI 길이 변경
 Fig. 5. 1 PRI length variation based on repetition count

3.3 PRF 가변 값 검증을 위한 지상 전달 정보

스캔트 운용 시 PRF 가변 값이 위성 탑재 영상레이다 시스템에 올바르게 적용되었는지 지상에서 확인 가능한 제어소프트웨어를 설계하였다. 설계의 주목적은 지상에서 위성체로 송부된 가변 PRF 명령이 위성 탑재 영상레이다 시스템에 올바르게 전달되고, 실제로 가변 PRF에 따라 운용되었는지를 분석하고 검증하는 데 있다.

3.3.1 SAR 부수 정보 설계

부수 정보는 위성의 자세, 위치 등을 포함하는 데이터로 SAR 데이터 획득과 동시에 주기적으로 생성되어 지상으로 전송된다. 본 연구에서는 부수 정보에 지상으로부터 수신한 운용 명령(그림 3)을 저장하도록 하였다(그림 6). 해당 데이터를 통해, 지상에서 PRF 가변 명령이 위성체 플랫폼을 지나, 영상레이다 제어소프트웨어로 정확히 전달되었으며,

위성이 이를 정상적으로 수신하고 적용했는지를 검증할 수 있다.

WORD Counter	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
...	Satellite Altitude Information															
...	Satellite Position Information															
...	SAR Sensor Temperature TM Information															
SAR MODE PARAMETER	PRI															
	PULSE LENGTH															
	SAMPLING LENGTH (MSW)															
	SAMPLING LENGTH (LSW)															
	...															
	PRI_ADJ_0															
	PRI_ADJ_1															
	...															
PRI_ADJ_7																
PRI_ADJ_8																

그림 6. 부수 정보의 모드 파라미터 구성
Fig. 6. Mode parameter in SAR ancillary data

3.3.2 SAR 데이터 헤더 설계

매 PRI 송신/수신된 신호를 기반으로 영상레이더 제어장치는 하나의 SAR 데이터 패킷을 생성한다. SAR 데이터는 해당 데이터 생성에 사용된 파라미터 값을 가지는 SAR 헤더 데이터와 실제 수신된 원시 데이터로 구성된다. 기존의 시스템에서는 획득한 SAR 데이터에 PRI 필드만 기술하였었다. 해당

값은 해당 데이터 생성 시 사용된 PRI 값을 나타냈다. 본 시스템에서는 그림 7과 같이 PRI 가변량이 추가로 기록되어 적용하였다. 이 정보를 통해 PRI 가변 값이 실제 SAR 데이터 획득 과정에서 정확하게 적용되었는지를 판단할 수 있다.

이처럼 두 데이터의 값을 기반으로, 실제 가변 PRF를 위한 파라미터가 영상레이더로 잘 전달되었는지와 계산 결과가 실제 PRI마다 어떻게 적용되었는지를 지상에서 확인 가능하였다.

IV. 시험 결과

4.1 시험 구성

본 논문에서 제시한 스캔트 운용을 위한 제어 소프트웨어 가변 PRF 적용 설계 사항을 검증하기 위해 지상 시험 환경을 구성하였다. 시험 과정에서는 제어장치 시험 통제 장치(Test control unit)를 이용하며 해당 장치는 운용 명령을 제어기로 전송해주는 플랫폼(Platform) 및 운용 명령을 처리하기 위한 제어기를 모사하고 있으며 생성된 PRI의 길이를 측정하기 위하여 오실로스코프(Oscilloscope) 계측기를 포함하고 있다.

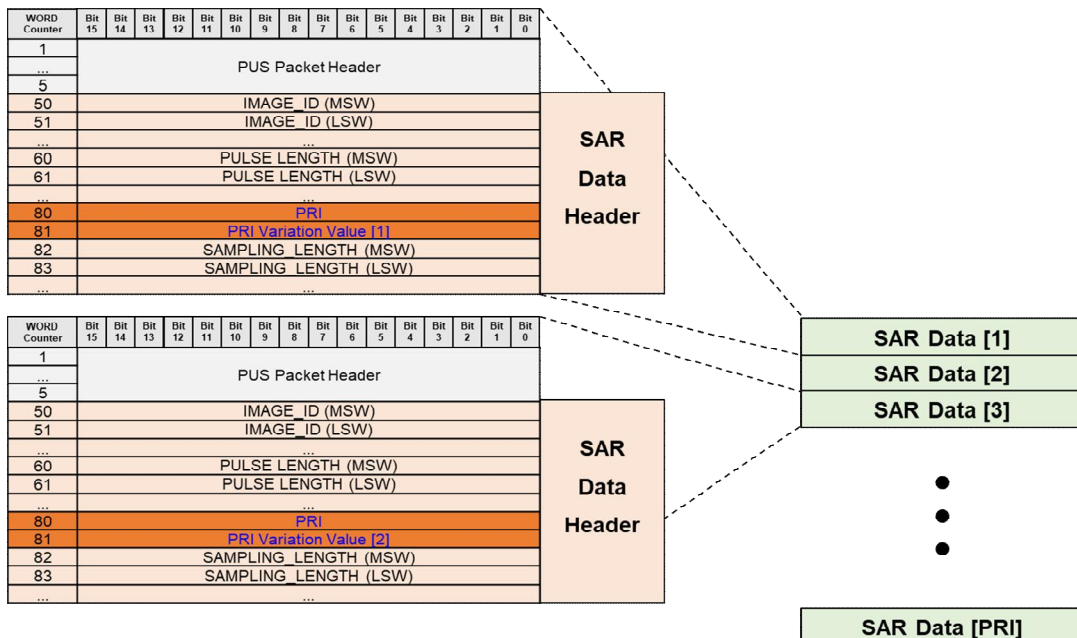


그림 7. SAR 데이터 헤더 PRI 가변 값 확인 구조
Fig. 7. PRI variation value of SAR data header

제어장치 시험통제 장치는 가변 정보를 포함한 운용 명령을 생성하고, 이를 영상레이더 제어소프트웨어로 전송한다. 제어소프트웨어는 수신된 운용 명령의 정보를 기반으로 가변 PRF를 위한 제반 데이터 생성 및 타이밍 신호 생성이 이루어진다. PRI의 가변결과는 이벤트 로그 분석 및 실시간 PRI 길이 측정을 통해 검증한다. 이를 위해 다음과 같은 주요 검증 절차를 수행하였다. 첫 번째는 이벤트 로그 분석으로, 장치 동작 후 수신된(지상 시험 시: 시험장치에 저장된) 부수 정보의 모드 파라미터 필드를 확인하여 명령이 영상레이더 제어소프트웨어로 정상 전송되었는지 검증하였다. 그리고 시험장치에 저장된 SAR 데이터 헤더의 PRI 및 PRI 가변 값 필드를 분석하여 운용 모드 중 SAR 데이터 획득 과정에서 적용된 값이 지상에서 예측된 값과 오류 없이 적용되었는지 확인하였다. 두 번째는 실제 장치 생성 PRI 타이밍 신호 검증으로 실제 제어장치 하드웨어에서 의도대로 신호 생성이 되었는지 오실로스코프 계측기 활용하여 동작 중간의 PRI_SYNC 생성 신호 길이를 측정하였다.

4.2 시험 시나리오 및 결과 분석

본 논문에서 설계한 기능을 검증하기 위해 운용 모드 변수를 다음과 같이 설정하였다. PRI 길이가 179.76 μ s, IMA_LEN=105, PRI_STEP=3으로 설정하였으며, PRI_ADJ_0~8 값은 각각 다음과 같이 적용되었다.

- PRI_ADJ_0 = 7.00009679794
- PRI_ADJ_1 = -0.15802374482
- PRI_ADJ_2 = 0.00014103368
- PRI_ADJ_3 ~ PRI_ADJ_8 = 0

해당 변수들과 식 (1) 을 기반으로 운용 모드 동안 사용될 PRI 가변 값을 계산할 수 있으며 시험 장비의 하드웨어 클럭(Clock) 값은 24ns이다. 계산된 결과값은 다음과 같다.

- 3.84 μ s, 2.48 μ s, 1.2 μ s

본 시나리오를 기반으로 임무 수행을 가정한 시험 결과는 그림 8 ~ 그림 11에서 확인할 수 있으며, 이벤트 로그는 해당 정보를 구문분석하여 엑셀 형식의 데이터로 변환 후 검토하였다.

그림 8은 SAR 부수 정보의 모드 파라미터 로그에서 PRI 변환 값과 관련된 정보들을 발췌하여 정리한 결과이다. 그림 8에서 볼 수 있는 것과 같이 각 변수가 시나리오에서 사용된 운용 명령의 값과 동일하게 설정된 것을 확인할 수 있으며 이를 통하여 운용 명령이 정상적으로 전송된 것을 알 수 있다.

SAR Ancillary Data log (Mode Parameter)		
WORD#	Field Type	Value
2	IMA_LEN	105
3	PRI_STEP	3
76	PRI_ADJ_0	7.00009679794
77	PRI_ADJ_1	-0.15802374482
78	PRI_ADJ_2	0.00014103368
79	PRI_ADJ_3	0
80	PRI_ADJ_4	0
81	PRI_ADJ_5	0
82	PRI_ADJ_6	0
83	PRI_ADJ_7	0
84	PRI_ADJ_8	0

그림 8. 시험 결과 로그(SAR 부수 정보)
Fig. 8. Test result log(SAR ancillary data)

PRI 가변 값이 실제 SAR 데이터 획득 과정에서 오류 없이 적용되었는지는 SAR 데이터 헤더의 로그를 구문분석하여 확인할 수 있으며 이는 그림 9와 같다.

그림 9와 같이 PRI 가변 값이 1~5416번 PRI에는 3.84 usec이며 5417~7516번 및 7517~11327번 PRI에는 각각 2.4 usec와 1.2 usec가 적용된 것을 확인할 수 있다. 그림 10 및 그림 11은 오실로스코프를 통하여 실제 하드웨어에서 생성하는 PRI 타이밍 신호 길이를 측정한 결과이다. 그림 10은 첫 번째 PRI 가변 값 변경 지점을 측정한 것이다. 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 5416번 PRI의 길이는 운용 명령어로 설정한 본 PRI 길이에 PRI 가변 값 3.84 usec가 적용되어 183.61 usec인 것을 알 수 있으며 5417번 PRI의 길이는 PRI 가변 값 2.4 usec가 적용

되어 182.16 usec인 것을 확인할 수 있다. 두 번째 PRI 가변 값 변경 지점은 그림 11에서 확인할 수 있으며 PRI 가변 값 1.2 usec가 적용되어 7518번 PRI의 길이가 180.96 usec인 것을 볼 수 있다.

SAR Data Packet#	PRI Cnt.	Packet Type	OBT Count Value	PRI Variation (usec)
1	83	Noise	2069646574.7306671	3.84
2	85	Noise	2069646574.7310333	3.84
3	87	Noise	2069646574.7313995	3.84
204	486	Cal	2069646574.8036041	3.84
205	517	Echo (First)	2069646574.8093567	3.84
206	518	Echo	2069646574.8095398	3.84
207	519	Echo	2069646574.8097229	3.84
3704	5416	Echo	2069646575.4517670	3.84
3705	5417	Echo	2069646575.4519501	2.4
3706	5418	Echo	2069646575.4521332	2.4
3707	5419	Echo	2069646575.4523163	2.4
7203	7515	Echo	2069646576.0891418	2.4
7204	7516	Echo	2069646576.0893250	2.4
7205	7517	Echo	2069646576.0895081	1.2
7206	7518	Echo	2069646576.0896912	1.2
10702	11014	Echo	2069646576.7223358	1.2
10703	11015	Echo	2069646576.7225189	1.2
10704	11016	Echo (Last)	2069646576.7226868	1.2
10705	11022	Cal	2069646576.7237091	1.2
10908	11327	Noise (Last)	2069646576.7788239	1.2

그림 9. 시험 결과 로그(SAR 데이터 패킷 헤더)
Fig. 9. Test result log(SAR data packet header)



그림 11. 시험 결과 로그 2(계측기 화면 도시 정보)
Fig. 11. Test result log 2(Oscilloscope display information)

V. 결론

본 논문에서는 위성 탑재 영상레이다의 스캔트 운용을 위한 제어 소프트웨어 설계 및 운용 고려사항을 제시하였다. 이를 위해 가변 PRF를 위한 다항식을 설계하고 다항식 계수 값을 지상에서 전송하는 방법으로 반영하였다. 또한 기존의 타이밍 설계 구조를 최대한 유지하면서, PRF 가변이 가능하기 위한 추가 구조를 반영하였다.

본 연구는 다음의 기여를 갖는다. 첫째로 기 설계된 타이밍 제어 구조에 추가 메모리나 하드웨어 변경 없이 적용 가능한 알고리즘 제시하였다. 두 번째로 제시된 알고리즘을 바탕으로 실제 구현하여 개발되었던 제어소프트웨어에 적용 및 실제 하드웨어 탑재를 통한 기능 검증이 수행되었다.

References

- [1] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar", Artech House, 2005.
- [2] U. Ko, I. Seo, J. Lee, and H. Jeong, "Current Trends of the Synthetic Aperture Radar (SAR) Satellite Development and Future Strategy for the High Resolution Wide Swath (HRWS) SAR Satellite Development", J. Space Technol. Appl., Vol. 1, No. 3, pp. 337-355, Nov. 2021. <https://doi.org/10.52912/jsta.2021.1.3.337>.



그림 10. 시험 결과 로그 1(계측기 화면 도시 정보)
Fig. 10. Test result log 1(Oscilloscope display information)

[3] A. Moreira, et al., "A tutorial on synthetic aperture radar", IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 1, No. 1, pp. 6-43, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>.

[4] G. Krieger and A. Moreira, "Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions", Proc. of the IEEE, Vol. 98, No. 5, pp. 894-920, May 2010. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043030>.

[5] J. S. Lee, et al., "SAR image processing for remote sensing", IEEE Signal Proc. Magazine, Vol. 31, No. 4, pp. 54-68, Jul. 2014. <https://doi.org/10.1109/MSP.2014.2309691>.

[6] P. A. Rosen, et al., "Synthetic aperture radar interferometry", Proc. of the IEEE, Vol. 88, No.3, pp. 333-382, Mar. 2000. <https://doi.org/10.1109/5.838084>.

[7] D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface", Reviews of Geophysics, Vol. 36, pp. 441-500, Nov. 1998. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>.

[8] E. Kaplan and C. Hegarty, "Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications", Artech House, 2006.

[9] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, "Deep Learning", Genetic Programming and Evolvable Machines, Vol. 19, pp. 305-307, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>.

[10] H. Lee, H. Lee, J. Lee, S. Kim, and J. Sung, "Imaging Time Correction Techniques Design and Implementation of Satellite SAR Payload", Journal of KIIT, Vol. 20, No. 8, pp. 113-122, Sep. 2022. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.8.113>.

[11] H. Lee, J. Lim, H. Lee, and S. KIM, "Timing Data Structure Optimization Technique for Spaceborne SAR Operation", Proc. of the KIMST, Vol. 2018, pp. 195-196, 2018. https://www.kimst.or.kr/electronic_paper/index.kin?gubun=3&year=2018&type=total

저자소개

이 호 창 (Hochang Lee)



2006년 2월 : 중앙대학교
컴퓨터공학과(공학사)
2008년 2월 : 중앙대학교
컴퓨터공학과(공학석사)
2013년 2월 : 중앙대학교
컴퓨터공학과 (공학박사)
2013년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 영상레이다 제어 소프트웨어

이 아 름 (Arim Lee)



2017년 2월 : 충남대학교
정보통신공학과(공학사)
2019년 2월 : 충남대학교
전자전파정보통신공학과
(공학석사)
2019년 3월 ~ 현재 :

국방과학연구소 연구원
관심분야 : 영상레이다 제어 소프트웨어

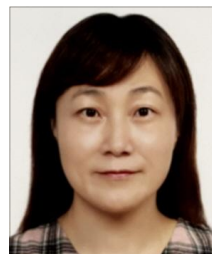
차 경 현 (Kyunghyun Cha)



2014년 8월 : 광운대학교
전파공학과(공학사)
2016년 8월 : 광운대학교
전파공학과(공학석사)
2016년 10월 ~ 현재 :

국방과학연구소 연구원
관심분야 : 영상레이다 제어
소프트웨어

성 진 봉 (Jinbong Sung)



1998년 2월 : 충남대학교
전파공학과(공학사)
2000년 2월 : 충남대학교
전파공학과(공학석사)
2022년 2월 : 충남대학교
전파공학과(공학박사)
2001년 12월~ 2006년 12월 :

한국전자 통신연구원 연구원
2007년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 영상레이다