

## 위성 탑재 영상레이다의 보정 경로 패턴 합성 기법

## Calibration Path Pattern Synthesis Technique for Satellite SAR Payload

이재덕<sup>1</sup> · 김세영<sup>2</sup> · 이종환<sup>3</sup> · 이동우<sup>4</sup> · 류지호<sup>5</sup> · 성진봉<sup>6</sup>Jae-Deok Lee<sup>1</sup> · Se-Young Kim<sup>2</sup> · Jong-Hwan Lee<sup>3</sup> · Dong-Woo Yi<sup>4</sup> · Ji-Ho Ryu<sup>5</sup> · Jin-Bong Sung<sup>6</sup>

## 요 약

위성 탑재 영상레이다의 운용 온도는 궤도에 따라 크게 변하기 때문에 지상에서 온도 변화에 따른 영상레이다의 성능을 특성화하는 과정이 필수적으로 요구된다. 이와 같은 과정에서 온도에 따른 안테나 패턴 건전성 검증과 특성화는 매우 중요한 시험 항목이나, 무반향실 내 시험 환경 구축 제약으로 인하여 상온 및 제한적인 온도범위에서 안테나 패턴이 검증되었다. 본 논문에서는 위성 탑재 영상레이다가 보유하고 있는 내부 보정 경로를 활용하여 온도에 따른 안테나 패턴 특성화 및 검증을 더욱 간편하고 빠르게 수행하는 합성 기법을 제안한다. 본 기법은 실시간 빔 조향을 위해 매 펄스 반복 주기별 안테나 급전계수의 위상 기울기를 변경하는 것을 보정 경로를 통하여 획득하여 안테나 패턴을 합성한다. 온도에 따라 송수신 모듈 위상 특성 변화를 보정 경로를 이용하여 획득하여 합성하고, 실제 하드웨어를 이용한 원전계 측정 결과와의 비교 분석을 통해 본 기법의 유효성에 대해 검증하였다.

## Abstract

The verification and characterization of the temperature stability of the antenna pattern is an important parameter during on-ground characterization because the operating temperature of the satellite SAR payload varies significantly depending on the orbit. Here, we propose a pattern synthesis technique that effectively verifies and characterizes the antenna beam pattern over temperature using the internal calibration path of a satellite SAR payload. The calibration path pattern is obtained by applying a phase ramp over the antenna elements, and this phase ramp is varied for every pulse repetition interval during the measurement via the calibration path. The feasibility of the proposed technique is verified using the measured antenna pattern in the near-field test over the temperature range, and the verification results are presented.

Key words: Synthetic Aperture Radar, Calibration Path, Characterization, Antenna Pattern Verification, Beam Steering

## I. 서 론

우주환경에서 운용되는 위성 탑재 영상레이다(SAR, synthetic aperture radar)의 운용 온도는 지구, 태양, 영상레

이다의 상대적인 위치에 따라 크게 변한다. 그러므로 온도 변화에 따른 영상레이다의 기능 및 성능에 대한 검증과 특성화하는 과정은 지상에서 필수적으로 요구된다. 최근 위성 탑재 영상레이다는 다양한 운용상황에 적합

국방과학기술연구소 우주기술센터(Space Technology Center, Agency of Defense Development)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-8742-7389>), 2: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-5112-3524>), 3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-5032-4378>), 4: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-1149-9954>), 5: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-5777-0725>), 6: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-5028-0990>)

· Manuscript received December 27, 2022 ; Revised January 9, 2023 ; Accepted January 25, 2023. (ID No. 20221227-110)

· Corresponding Author: Se-Young Kim (e-mail: [ksy0730@add.re.kr](mailto:ksy0730@add.re.kr))

한 서로 다른 안테나 패턴 생성을 위해 수백 개의 송수신 모듈(T/R module, transmit/receive module)로 구성된 능동 위상배열안테나가 주로 사용되고 있다. 그리고 초고해상 영상 획득을 위한 실시간 안테나 빔 조향 기능도 요구되고 있는 추세이다<sup>[1]</sup>. 안테나 패턴은 각 송수신 모듈의 이득과 위상 출력 특성에 직접적인 영향을 받으므로, 온도에 따른 안테나 패턴 건전성 검증과 특성화는 지상에서 매우 중요한 시험 항목 중 하나이다.

지상에서 온도에 따른 안테나 패턴 건전성과 특성화는 무반향실 내 시험 환경 구축 제약으로 인하여, 상온 및 제한적인 온도 범위 내에서만 검증되고 있다. 이를 보완하기 위해서 온도에 따른 복사소자, 안테나 구성 유닛 특성화 결과 그리고 상온에서 측정된 안테나 패턴이 적용된 안테나 모델을 이용한 검증 방법이 활용되고 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 검증은 안테나를 구성하는 하드웨어의 온도에 따른 특성화를 위해 많은 시간이 소요되고, 안테나 모델의 검증 과정이 별도로 필요하기 때문에 온도에 따른 안테나 패턴 검증 기법 개발이 활발하게 진행 중이다<sup>[3]</sup>.

위성 탑재 영상레이다는 영상 획득 전후 영상레이다 시스템의 기능과 성능에 대한 주기적인 모니터링을 위해 그림 1과 같이 별도의 내부 보정 경로를 보유하고 있다. 내부 보정 경로는 실제 레이더 신호가 송수신되는 전체 경로를 아우르는 송신 보정 경로와 수신 보정 경로로 구성되어 있다. 안테나의 송수신 모듈을 포함하는 내부 보정 경로를 통해 획득한 신호를 활용하면 송신, 수신 경로를 특성화할 뿐만 아니라, 송수신 안테나 패턴의 특성을 가늠할 수 있다.

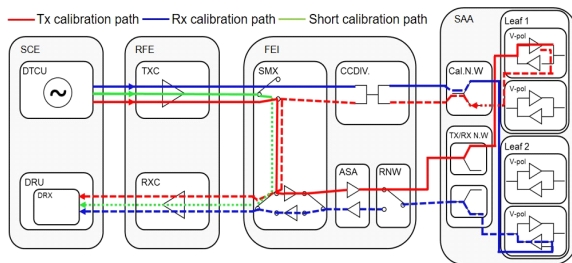


그림 1. 내부 보정 경로를 포함하고 있는 위성 탑재 영상레이다의 간략 구조도

Fig. 1. Block diagram of satellite SAR payload with internal calibration path.

본 논문에서는 위성 탑재 영상레이다가 보유하고 있는 내부 보정 경로를 활용하여, 온도에 따른 안테나 패턴 특성화와 검증을 더욱 빠르고 간편하게 수행하는 합성 기법을 제안한다. 먼저, 보정 경로 패턴 합성 기법 원리에 대해 서술하고, 시뮬레이션을 통한 보정 경로 패턴 합성 결과를 제시한다. 마지막으로, 고각 방향으로 16개의 송수신 모듈로 구성된 능동 위상배열안테나를 이용한 원전계 측정 결과와, 본 기법을 적용하여 측정된 온도에 따른 보정 경로 패턴 합성 결과와의 비교 분석을 통해 본 기법의 유효성을 검증하였다.

## II. 보정 경로 패턴 합성 기법

본 논문에서 제안하는 보정 경로 패턴 합성 기법의 개념도를 그림 2에 나타내었다. 보정 경로 패턴 합성 기법은 일반적인 근접 전계 측정 시설을 활용한 원전계 패턴과 다르게, 매 펄스 반복 주기마다 안테나 급전계수의 위상 기울기를 변경한다. 그리고 모든 송수신 모듈의 신호가 동위상으로 더해진 하나의 신호의 크기만으로 보어서 이트 패턴을 합성할 수 있다. 보정 경로 패턴 합성 기법은

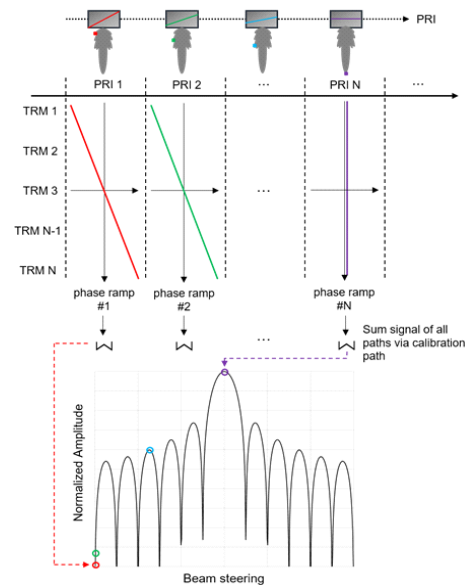


그림 2. 보정 경로 패턴 합성 기법에 대한 구성도

Fig. 2. Schematic of calibration path pattern synthesis technique.

송수신 모듈을 포함하는 내부 보정 경로를 이용하여 신호를 획득하고 합성한다. 따라서 온도에 따른 송수신 모듈의 위상 특성 변화가 반영된 안테나 패턴이 합성하기 때문에, 보정 경로 패턴 합성 기법을 활용하면 송수신 안테나 패턴의 온도 건전성을 검증할 수 있다. 보정 경로 패턴 합성은 매 펄스 반복 주기마다 각 송수신 모듈에 점진적으로 변화하는 위상 기울기를 적용함으로써 합성할 수 있다.

이를 수학적 배경에 의거하여 정의하면, 보정 경로 패턴(CP, calibration path pattern)은 식 (1)과 같다.

$$CP(N, \Delta\phi) = \sum_{n=1}^N a_n e^{jn\Delta\phi} \quad (1)$$

$N$ 은 위성 탑재 영상레이다 안테나의 송수신 모듈 개수,  $a_n$ 은 각 송수신 모듈에 인가되는 급전계수 크기 성분,  $\Delta\phi$ 는 각 송수신 모듈 간 위상 차이를 의미한다. 송수신 모듈 간의 물리적 거리에 기초하는 안테나 패턴과 보정 경로 패턴과의 주요한 차이는, 보정 경로 패턴의 특성은 오직 송수신 모듈의 개수에 의해서만 결정된다는 것이다. 보정 경로 패턴 합성 기법의 주요한 목적은 온도에 따른 송수신 모듈 특성 변화가 반영된 안테나의 온도 건전성 검증과 특성화이므로, 일반적인 안테나 패턴과 다르게 주엽 확장과 부엽 레벨 저감을 위한 송수신 모듈 급전계수의 크기 조절은 불필요하다.

따라서 본 논문에서는 보정 경로 패턴 합성 시 송수신 모듈 급전계수의 크기 성분은 고려하지 않는다.

### III. 보정 경로 패턴 합성 결과

그림 3은 MATLAB 시뮬레이션을 통해 계산한 송수신 모듈 개수에 따른 이상적인 보정 경로 패턴 합성 결과를 나타낸다. 안테나는 고각 또는 방위각 방향으로 4개, 8개의 송수신 모듈로 구성된 능동 위상배열안테나로 가정하였다. 모든 송수신 모듈의 초기 급전계수는 0 dB, 0°로 설정하였으며, 보정 경로 패턴 합성 기법은 보정 경로를 보유한 어떠한 능동 위상배열안테나 구조에 적용이 가능하다.

그림 3의 이상적인 보정 경로 패턴 합성 결과를 통해, 보정 경로 패턴의 주요 특성을 다음과 같이 정의할 수 있

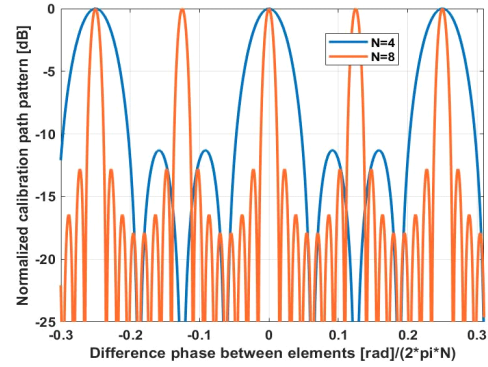


그림 3. 송수신 모듈 개수에 따른 이상적인 보정 경로 패턴 합성 결과

Fig. 3. Result of ideal calibration path pattern according to T/R module number.

다. 이러한 주요 특성은 안테나 패턴 온도 건전성 검증과 특성화 과정에서 보정 경로 패턴 합성 결과의 성능 판단 지표로 활용될 수 있다. 특히 주엽의 위치 및 부엽의 대칭성은 온도에 따른 안테나 패턴 건전성 판단을 위한 주요 지표로 활용될 수 있다.

- 빔의 개수:  $N-1$
- 첫 번째 널의 위치:  $2\pi/N$
- 주엽의 위치:  $2\pi$
- 부엽의 대칭성

그림 4는 본 논문에서 제안하는 보정 경로 패턴 합성 기법을 실제 하드웨어에 적용하여, 안테나 패턴의 온도

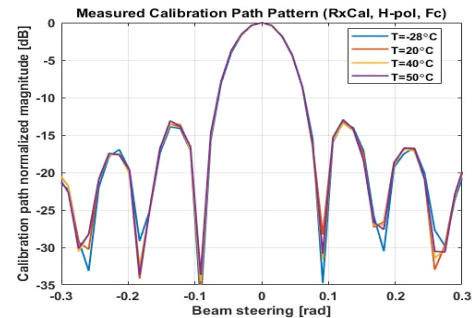


그림 4. 보정 경로 패턴 합성 기법을 이용한 안테나 패턴 온도 건전성 검증 결과(수신 보정 경로, 수평 편파, 중심주파수)

Fig. 4. The validation of the temperature stability of the antenna pattern using CP (RxCal, H-pol, Fc).

건전성을 검증한 결과이다. 측정에 활용된 안테나의 구조는 고각 방향으로 16개의 송수신 모듈로 구성되어, 고각으로 빔 조향이 가능한 능동 위상배열안테나이다. 먼저, 영상레이다 운용 온도 내 안테나 패턴의 온도 건전성 검증을 위해, 열 진공(thermal vacuum) 챔버를 이용하여 온도에 따른 보정 경로 패턴 합성 결과를 측정하였다.

다음으로, 본 기법의 유효성 검증을 위한 비교 데이터인 원전계 패턴을 그림 5에 나타내었다. 원전계 패턴은 근접 전계 측정 시설 내 시험 환경 구축 제약으로 인하여 상온(40℃)과 고온(40℃)에서만 측정하였다.

안테나 패턴 온도 건전성 검증은 수직/수평 편파와 중심/수신 패턴에 대해 모두 수행하였으며, 주파수는 중심 주파수에서 측정하였다. 이와 같이 온도에 따른 보정 경로 패턴 합성 결과와 근접 전계 측정 시설을 이용한 원전계 측정 결과를 획득한 후 표 1에 나타낸 바와 같이 두 측정 결과를 비교 분석하여, 본 기법의 유효성을 검증하였다. 두 패턴 간의 주엽과 부엽의 특성은 매우 일치하는 결과를 보이므로, 온도에 따른 송수신 모듈의 특성이 잘 반영되었음을 확인하였다. 두 측정 간의 오차는 최대 -0.07 dB로 크게 차이가 없는 결과를 보였다.

따라서 본 논문에서 제안하는 보정 경로 패턴 합성 기법을 이용한 안테나 패턴 온도 건전성 검증이 유효함을 확인하였다.

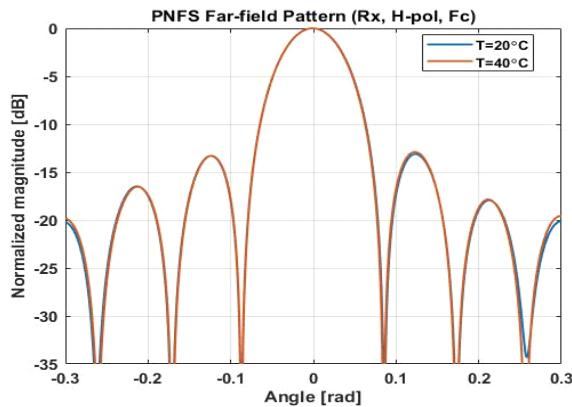


그림 5. 근접 전계 측정 시설을 이용한 안테나 패턴 온도 건전성 검증 결과(수신, 수평 편파, 중심주파수)

Fig. 5. The validation of the temperature stability of the antenna pattern using PNFS (Rx, H-pol,  $F_c$ ).

표 1. 안테나 패턴 온도 건전성 검증 결과(이득 차이,  $G_{40} - G_{20}$ )

Table 1. The validation result of the temperature stability of the antenna pattern (gain difference,  $G_{40} - G_{20}$ )

Mode ( $F_c$ )	Calibration path pattern (A)	PNFS far-field pattern (B)	Difference (A-B)
HP-RX	0.04	0.01	0.03
HP-TX	-0.25	-0.19	-0.06
VP-RX	-0.13	-0.10	-0.03
VP-TX	-0.26	-0.19	-0.07

#### IV. 결 론

본 논문에서는 위성 탑재 영상레이다의 내부 보정 경로를 이용한 보정 경로 패턴 합성 기법을 제안하였다.

보정 경로 패턴 합성 기법의 원리, 시뮬레이션 결과 그리고 상온과 고온에서 측정된 원전계 패턴과의 비교 분석을 통하여 본 기법의 유효성에 대해 검증하였다. 제안된 보정 경로 패턴 합성 기법은 온도에 민감한 송수신 모듈의 위상 특성을 직접적으로 반영함으로써, 지상뿐만 아니라 궤도상에서도 온도에 따른 안테나 패턴 검증을 더욱 빠르고 쉽게 수행할 수 있는 장점이 있다.

#### References

- [1] Y. C. Hwang, C. H. Nam, U. Y. Pak, S. Y. Kim, and J. H. Lee, "KOMPSAT-6 SAR payload system design," in *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Hamburg, Jun. 2016, pp. 1-3.
- [2] M. Schwerdt, B. Brautigam, M. Bachmann, B. Doring, D. Schrank, and J. H. Gonzalez, "Final TerraSAR-X calibration results based on novel efficient method," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 2, pp. 677-689, Feb. 2010.
- [3] S. Y. Kim, J. B. Sung, and A. Torre, "In-orbit antenna pattern extraction method for active phased-array SAR antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 317-320, Jun. 2016.