

차세대 SAR 위성의 고해상도 광역관측을 위한 F-Scan 안테나 시스템 설계 및 성능 분석

F-Scan Antenna System Design and Performance Analysis for High-Resolution and Wide-Swath Next-Generation SAR Satellites

김동현¹ · 이용혁² · 김성필³ · 윤성식⁴

Donghyun Kim¹ · Yong Hyeok Lee² · Sungpeel Kim³ · Seong-Sik Yoon⁴

요 약

본 논문에서는 차세대 SAR(synthetic aperture radar) 위성에서 요구되는 고해상도 광역관측(HRWS, high-resolution and wide-swath) 구현을 위한 F-Scan(frequency-scan) 안테나 시스템 설계 및 빔 성능에 대해 분석한다. X-대역에서 1.5 GHz 대역폭을 만족하는 1×24 이중편파 도파관 슬롯 배열 안테나가 단위 부배열 구조로 적용된 위상배열 안테나를 설계하고, 위상천이기와 실시간 지연기(TTDL, true-time delay line)를 통해 고각 방향 최대 빔 조향 시의 빔 편이 현상을 증가시킨 F-Scan 성능을 분석한다. 제안된 F-Scan 안테나 시스템은 목표 운용 궤도의 45° 입사각에서 관측폭 00 km 이상 및 해상도 1 m 이하의 성능을 만족한다.

Abstract

This paper presents the design of an antenna system for F-Scan implementation, enabling high resolution and wide swath (HRWS) capabilities for next-generation SAR satellites. The proposed phased array antenna consists of sub-arrays, each comprising a 1×24 dual-polarized slotted array waveguide antenna with a bandwidth of 1.5 GHz in the X-band. The wide swath width in the F-Scan technique is achieved by enhancing beam squint through phase shifters and true time delay lines (TTDLs) at the maximum electronic beam steering angle along the elevation plane. Beam performance analysis results indicate that the proposed F-Scan antenna system achieves a resolution of 1 m and a swath width of 00 km at a 45° incidence angle on the target mission orbit.

Key words: Synthetic Aperture Radar, High-Resolution and Wide-Swath, Frequency-Scan, Phased Array Antenna, True-Time Delay Line

I. 서 론

위성용 합성 개구 레이더(SAR, synthetic aperture radar) 탑재체는 기상 조건 및 주/야에 관계없이 표적 영상을 획득할 수 있으며, 실 개구 레이더(RAR, real aperture radar)에 비해 작은 개구면을 이용하여 동등 수준의 방위 해상

도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 기존 위성용 SAR 탑재체는 방위 해상도를 향상시키기 위해 높은 PRF(pulse repetition frequency)가 요구되지만, 이로 인해 거리 방향에서의 반향 신호를 모두 수신할 수 없어 거리 관측폭(range swath)이 저하되며, 관측폭 개선을 위한 ScanSAR 모드의 경우 각 단위 관측폭에 할당되는 관측 시간이 짧

한화시스템(Hanwha Systems)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-9085-5509>), 2: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-0253-2751>),

3: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0001-8243-8265>), 4: 전문연구원/팀장(<https://orcid.org/0000-0002-5764-5403>)

· Manuscript received December 19, 2024 ; Revised January 14, 2025 ; Accepted January 14, 2025. (ID No. 20241219-136)

· Corresponding Author: Seong-Sik Yoon (e-mail: yss111@hanwha.com)

아 낮은 PRF로 인해 방위 해상도 성능이 저하된다. 이러한 한계점을 해결하기 위해 F-Scan(frequency-scan) 및 ScoRe(scan-on-receive) 모드 등 다양한 고해상도 광역관측(HRWS, high-resolution wide-swath) 기법들이 연구되고 있다^[1]. 그림 1(a)와 같이 ScoRe 모드는 고각 방향 채널을 분리하여 단일 채널에서 fan-beam 송신을 통한 넓은 거리 관측폭 확보 및 전체 채널에서의 디지털 빔포밍 수신을 통해 높은 PRF를 유지함으로써 거리 모호성 개선 및 거리 관측폭을 향상시킬 수 있다^[1]. 하지만 해당 기술은 디지털 빔포밍이 필요하여 시스템 설계 복잡도가 증가해, 다수의 ADC로 인해 소모 전력이 증가한다. 이러한 단점을 보완할 방안으로 제안된 F-Scan 모드는 그림 1(b)와 같이 복잡한 디지털 시스템 대신 위상 천이기(PS, phase shifter)와 실시간 지연기(TTDL, true-time delay line)를 통해 전자적 조향 빔의 주파수에 따른 빔 편이 현상을 증가시켜 넓은 거리 관측폭을 확보하는 기법이다^[1]. 또한, 거리 방향에서의 반향 신호를 동시에 수신할 수 있어 높은 PRF를 유지할 수 있다. 그러나 기존 F-Scan 선행 연구결과와는 신호처리 기반 SAR 성능을 다루며, 구체적인 안테나 시스템 설계를 고려한 연구결과는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 위상배열 안테나 시스템 설계와 PS 및 TTDL을 이용한 F-Scan 모드를 구현하고 목표 운용 궤도에서의 F-Scan 성능에 대한 분석 결과를 제시한다.

II. F-Scan 안테나 시스템 설계

2-1 배열 안테나 구조 설계

그림 2는 F-Scan 모드 구현을 위한 이중편파 도파관 슬롯 배열 안테나 형상을 나타낸다. 그림 2(a)와 같이 1×24 배열 안테나를 단위 부배열로 적용 및 고각 방향으로 8개

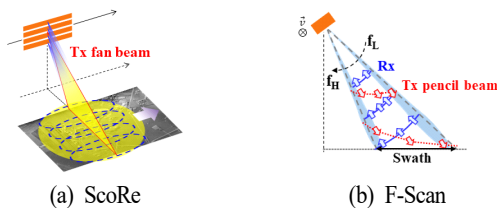
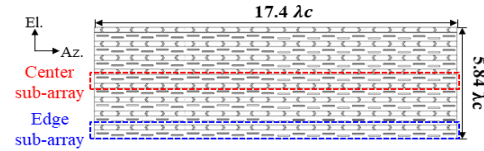
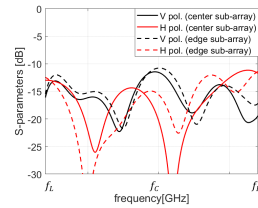


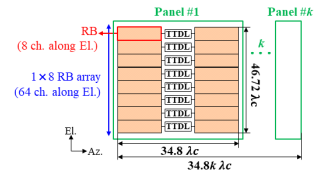
그림 1. HRWS SAR 운용 개념
Fig. 1. HRWS SAR schematic.



(a) 단위 방사 보드
(a) Unit radiating board



(b) 능동 반사 손실 모의실험 결과
(b) Simulated active return loss result



(c) 전체 배열 안테나
(c) Full-array antenna

그림 2. 제안된 안테나 형상 및 성능 모의실험 결과

Fig. 2. Proposed antenna configuration and simulated performance.

배열되어 1개의 단위방사 보드(RB, radiating board)를 구성한다. 단위 부배열 간 간격은 고각 방향 $\pm 20^\circ$ 전자적 빔 조향 성능을 고려하여 설계되었다. 또한, 각각의 단위 부배열에는 1개의 PS(6 bit, LSB : $5.625^\circ/0.5$ dB)가 배치되어 빔 조향뿐만 아니라 적용된 TTDL과 성능 편차를 보정한다. 그림 2(b)는 단위 RB 내 중심 및 외곽 단위 부배열 능동 반사 손실 모의실험 결과이며, 제안된 안테나는 X-대역에서 1.5 GHz 대역폭을 만족한다. 그림 2(c)는 안테나 전체 배열 구조도를 나타낸다. 전체 구조는 방위 방향으로 총 k 개의 패널로 구성되어 있으며, 1개의 패널은 2×8 RB 배열이다. 따라서, 전체 배열 안테나는 고각 방향으로 수직/수평 편파 각각 64 채널로 구성된다. 또한, 단위 RB 당 TTDL 1개가 배치된다. 설계된 배열 안테나의 빔 패턴을 고려한 TTDL 상세 설계는 다음 절에서 서술한다.

2-2 실시간 지연기 설계

일반적으로 위상배열 안테나의 전자식 빔 조향은 PS를 이용한 복사소자 간 위상차에 의해 구현된다. 하지만, 위상차는 주파수 의존 성분이므로 광대역에서 빔 조향 시,

빔 편이 현상이 발생한다. 일반적인 SAR 모드에서는 빔 포인팅 오차를 줄이기 위해 TTDL을 이용해 빔 편이 현상을 보상해야 하지만, F-Scan 모드에서는 TTDL을 통해 고각 방향 빔 편이 현상을 증가시켜야 한다. 따라서, 차세대 SAR 위성에서는 빔 편이 보상/증가 목적의 TTDL 공용화 설계가 요구된다. 먼저, 고각 방향 빔 편이 보상을 위한 최대 시간 지연값을 도출한다. 이는 파면이 형성되기 위한 최외곽 RB 간 필요한 시간 지연값을 의미하며, 그림 3과 같이 패널 내 최외곽 RB 중심 간 거리(d) 및 빔 조향 각도(θ)에 따라 도출된다. TTDL은 2의 거듭 제곱 채널 당 1개씩 배치할 수 있으며, 그 수가 클수록 적은 수의 TTDL이 필요하지만 부엽 크기가 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 8 채널 당 1개 TTDL의 경우를 선정한다. 그림 4는 빔 조향 각도에 따른 TTDL(LSB 10 ps) bit 수 별 빔 편이 특성을 나타낸다. bit 수가 증가할수록 목표 빔 조향 범위 내에서 빔 편이가 줄어들지만, 설계 복잡도 등을 고려한 최적의 bit 수 선정이 필요하다. 본 연구에서는 고각 방향 최대 빔 조향 $\pm 20^\circ$ 범위 내에서 고각 빔 조향 시 0.2° 이내로 발생하는 빔 편이는 허용하여 제안된 안테나 시스템에서는 5 bit TTDL 설계가 필요한 것을 도출하였다. 이와 같이 도출된 시간 지연 상태를 파면과 가까운 RB부터 먼 RB 순서로 점진적으로 시간 지연이 증가

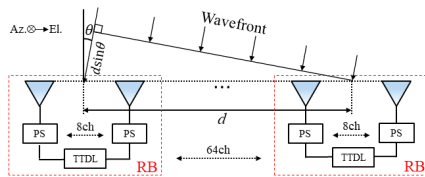


그림 3. F-Scan SAR 안테나 시스템 구조
Fig. 3. F-Scan SAR antenna system structure.

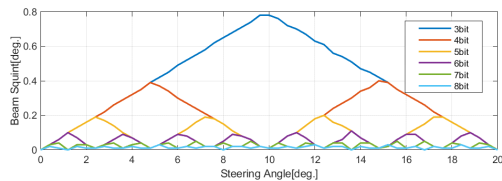


그림 4. 빔 조향 각도에 따른 TTDL bit 수 별 빔 편이 특성
Fig. 4. Beam squint characteristics by TTDL bit according to beam steering angle.

하도록 적용하여 빔 편이 현상을 보상한다. 그림 5는 5 bit TTDL 적용 유무에 따른 제안된 슬롯 배열 안테나의 20° 고각 빔 조향 성능 결과이다. PS만을 이용한 빔 조향 시에는 1.5 GHz 대역 내에서 $\pm 3.2^\circ$ 의 빔 편이가 발생하지만, PS 및 5 bit TTDL 적용 시에는 빔 편이가 보상된다. F-Scan 모드를 위한 빔 편이 증가는 보상을 위한 시간 지연 인가 순서와 반대로 파면과 거리가 먼 RB부터 낮은 시간 지연값이 적용된다. 이를 통해 PS에 의해 발생하는 빔 편이 현상이 TTDL에 의해 증가한다. 그림 6(a)는 빔 편이 보상용으로 설계된 5 bit TTDL을 빔 편이 증가 목적으로 적용한 결과를 나타내며, $\pm 6.3^\circ$ 의 빔 편이를 보인다. 그림 6(b)와 같이 bit 수를 추가해 최대 시간 지연값을 증가시키면 최대 빔 편이는 $\pm 9.4^\circ$ 로 증가된다. 하지만, 빔 편이를 증가시키기 위해 최대 시간 지연을 증가시킬수록 주파수 대역 양단에서의 부엽이 증가하게 된다.

III. F-Scan 성능 분석

F-Scan 모드는 주파수에 따른 pencil-beam의 빔 편이 현상을 이용하므로 일반적인 SAR 모드와 달리 거리 해상도를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[2].

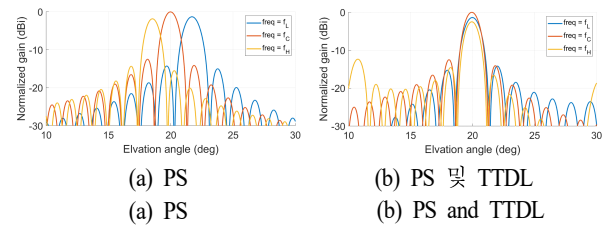


그림 5. 급전망에 따른 빔 편이 특성
Fig. 5. Beam squint characteristics according to feeding network.

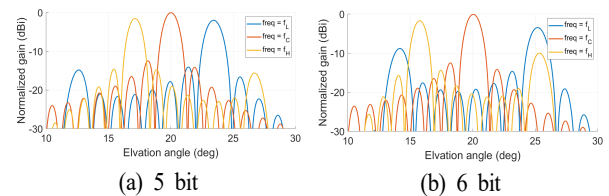


그림 6. TTDL bit 수 별 빔 편이 특성
Fig. 6. Beam squint characteristics by TTDL bit.

$$\delta_r = \frac{c}{2B_{TX_eff}\sin\theta} \quad (1)$$

여기서 c 는 전자기파 속도, B_{TX_eff} 는 유효 송신 대역폭, 그리고 θ 는 입사 각도이다. B_{TX_eff} 는 특정 off-Nadir 각도를 중심으로 해당 각도에 입사한 빔의 최대 이득 대비 이득 차이가 3 dB 이하를 만족하는 여러 빔의 운용 주파수 범위를 의미하며, 이는 거리 해상도에 반비례한다. 본 연구의 목표 운용 궤도에서 45° 입사각 조건에서는 목표 거리 해상도 1 m 이하를 만족하기 위해 약 220 MHz 이상의 B_{TX_eff} 가 필요하다. 또한, F-Scan 모드는 일반적인 SAR 모드 대비 duty cycle이 짧아 NESZ가 전체 송신 대역폭 (BTX) 대비 B_{TX_eff} 의 비율에 비례한다^[3]. 따라서, NESZ를 개선하기 위해서는 목표 거리 관측폭 및 해상도를 만족하는 적정 수준의 B_{TX} 와 B_{TX_eff} 도출이 필요하다. 그림 7은 제안된 슬롯 배열 안테나를 포함한 안테나 시스템이 목표 거리 관측폭 00 km 이상을 만족하기 위해 조향하는 off-Nadir 각도별 주파수에 따른 안테나 이득을 나타낸다. 그림 7(a)와 같이 PS를 통한 20° 빔 조향 및 5 bit TTDL을 통한 빔 편이 증가 시 목표 거리 관측폭에 조향되는 빔의 B_{TX} 는 약 820 MHz이며, B_{TX_eff} 는 약 280 MHz를 갖는다. 이 경우 거리 해상도는 약 0.75 m로 목표 대비 초과 충족하며, NESZ 성능은 저하된다. 이는 그림 7(b)와 같이 빔 편이를 증가시켜 해결할 수 있다. PS를 통한 20° 고각 빔 조향 및 6 bit TTDL 적용 시 B_{TX} 는 약 525 MHz, B_{TX_eff} 는 약 220 MHz가 되어 거리 해상도 약 1 m 및 NESZ 성능이 개선되어 목표 HRWS SAR 성능을 만족한다. 또한, 6 bit TTDL 적용 시 빔 편이가 증가하지만, 1.5 GHz 대비 적은 BTX를 사용하므로 부엽 크기도 개선된다. 이는 F-Scan 모드에서 빔 편이 증가는 더 좁은 주파수 대역을 사용함을 의미한다. 다만, SLL 및 NESZ 성능은 열화되더라도 광대역 주파수(B_{TX} 1.5 GHz) 사용 시에는 거리 관측폭 000 km 이상 및 해상도 약 0.8 m 이하의 F-Scan 성능을 확보할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 차세대 SAR 위성의 F-Scan 모드 구현을 위한 안테나 시스템 설계 및 성능 분석을 수행하였다. X-

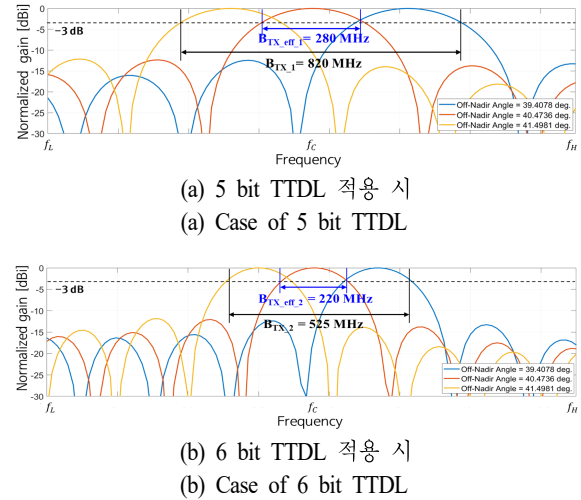


그림 7. 목표 Off-Nadir 각도별 주파수에 따른 안테나 이득
Fig. 7. Antenna gain according to frequency by off-Nadir angle.

대역에서 1.5 GHz 이상 대역폭을 만족하는 위상배열 안테나를 설계하고, PS 및 TTDL을 통한 F-Scan 모드 구현 및 성능 분석을 통해 목표 성능을 만족하기 위한 TTDL 요구성능 및 시스템 대역폭을 도출하였다. 제안된 F-Scan 안테나 시스템은 목표 운용 궤도의 45° 입사각에서 관측폭 00 km 이상 및 해상도 1 m 이하의 성능을 만족하며, 이는 일반적인 SAR 모드에서 동일 관측폭을 확보할 때의 방위 해상도 대비 약 3배 개선된 성능이다.

References

- [1] C. Roemer, "Introduction to a new wide area SAR mode using the F-SCAN principle," in *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Fort Worth, TX, Jul. 2017, pp. 3844-3847.
- [2] P. Guccione, D. Mapelli, D. Giudici, and A. R. Persico, "Design of f-SCAN acquisition mode for synthetic aperture radar," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 20, p. 5283, Oct. 2022.
- [3] N. Gollin, R. Scheiber, M. Martone, P. Rizzoli, and G. Krieger, "SAR imaging in frequency scan mode: System optimization and potentials for data volume reduction," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, p. 5200420, Dec. 2022.