

위성용 SAR 송수신 장치 설계 및 위상 잡음에 따른 IRF 특성 평가

Design of RF Unit for Satellite SAR and Evaluation of IRF Characteristics according to Phase Noise

류성현 · 안창영 · 이창현 · 윤성식

Sung-Heon Ryu · Changyoung An · Chang-Hyun Lee · Sung-Sik Yoon

요 약

위성 SAR(synthetic aperture radar) 시스템의 영상 품질을 평가하는 방법 중 하나로 IRF(impulse response function) 특성 분석이 있으며, 이를 통하여 SR(spatial resolution), PSLR(peak to side-lobe ratio), ISLR(integrated side-lobe ratio) 특성을 파악할 수 있다. SAR 시스템에서는 RF(radio frequency) 송수신 경로의 불완전성으로 인하여 영상 품질이 저하될 수 있으나, 일부 고정적인 특성에 대하여 전치왜곡 기법을 통해 보상함으로써 영상 품질의 저하를 완화할 수 있다. 그러나 RFU(radio frequency unit)에서 발생하는 위상 잡음 특성은 신호처리 보상이 어려운 영상 품질에 직접적인 영향을 주며, 세부적으로 ISLR 특성을 열화시킬 수 있다. 이러한 이유로 RFU 설계에 있어 위상 잡음 저감을 위한 사전 분석 및 분석 결과를 활용한 고안정 주파수 합성부 설계가 매우 중요하다. 본 논문에서는 고해상도 영상 획득을 가능하게 하는 광대역 RFU를 설계하며, 위상 잡음 특성을 사전 분석 후 SAR 시스템에 미치는 영향을 파악한다. 그리고, RFU 하드웨어 구현 및 측정하여, 설계된 시스템 모델이 유사하게 구현될 수 있는지에 대한 타당성 조사(feasibility study) 결과를 제시한다.

Abstract

Impulse response function (IRF) characteristics are one of the methods for evaluating the image quality of satellite synthetic aperture radar (SAR) systems, through which the spatial resolution (SR), peak-to-side-lobe ratio (PSLR), and integrated side-lobe ratio (ISLR) can be identified. Image quality can be degraded in SAR systems because of the incompleteness of radio frequency (RF) Transmitter (Tx) and Receiver (Rx) paths; however, image quality can be mitigated by compensating for some fixed characteristics through the pre-distortion scheme. However, the phase noise generated in the radio frequency unit (RFU) directly affects the image quality because it is difficult to compensate for signal processing and can degrade the ISLR. Therefore, it is important to design a high-stability frequency synthesis unit using pre-analysis and analysis results for phase noise reduction in the RFU design. In this study, a wideband RFU that enables high-resolution image acquisition was designed, and after pre-analysis of the phase noise characteristics, the effect on the SAR system was identified. By implementing and measuring the RFU, we represented the results of a feasibility study to determine whether the designed system model can be implemented similarly.

Key words: SAR, RFU, IRF, ISLR, Phase Noise

한화시스템 우주연구소(Department of Space R&D Center, Hanwha Systems)

· Manuscript received December 27, 2024 ; Revised January 9, 2025 ; Accepted January 27, 2025. (ID No. 20241227-139)

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

I. 서 론

군사 활동, 물류 선박의 위치 및 이동, 농업지 및 극지방 환경 변화 등에 대한 지구 관측 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 초기에는 EO(electro-optics) 위성을 이용한 관측이 활발히 이루어졌다. 그러나 EO 위성을 이용한 지구 관측은 태양의 활동 및 대기 환경에 따른 영향으로 관측 가능한 시간이 제한적이며, 이러한 단점을 극복하고자 전자파를 활용한 영상 레이다 위성이 개발되었다.

광학 관측과 달리 영상 레이다는 전자파를 이용한 관측 기법을 사용하기 때문에, 대기 환경의 영향에서 벗어나 관심 지역을 관측할 수 있다. 이러한 장점으로 인하여 영상 레이다에 대한 군사적 및 상업적 활용을 위한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 최근에는 다양한 분야에 복합적으로 활용하기 위하여 고해상도 광역 관측 기법인 F-SCAN^[1](frequency scanning), MAPS^[2](multiple aperture processing scheme), SCORE^[3](scan-on-receive) 등과 같은 SAR 기술 연구가 활발히 이루어지고 있다.

SAR 시스템은 일반적으로 LFM(linear frequency modulation) 펄스를 송신하고, 반사되어 돌아오는 echo 신호를 수신한 뒤, 이를 신호처리 하여 영상을 획득한다. 특히, 영상 촬영 목적에 따라 stripmap, spotlight, scan SAR 등의 다양한 운용 모드를 활용하여 신호를 송수신하고, 각 운용 모드별 고유의 특성을 갖는 영상을 획득한다^[4]. 세부적으로, SAR 시스템의 운용을 위해 다양한 파라미터들에 대한 설정이 이루어져야 하며, LFM 펄스 송수신을 정의하는 파라미터로는 PW(pulse width), Kr(chirp rate), PRI(pulse repetition interval), PRF(pulse repetition frequency), SWST(sampling window start time), SWL(sampling window length) 등이 있다^[5].

SAR 시스템에서는 수신받은 echo 신호를 영상화할 때 거리 및 방위 방향에 대해 펄스 압축을 수행하며, 이는 수신 신호에 분산되어 중첩된 에너지를 각 포인트로 다시 모아주는 역할을 한다. 펄스 압축 수행에 있어 정합 필터(matched filter)를 사용하며, 정합 필터의 선형 응답 함수(LTI, linear time-invariant) 특성과 이에 입력되는 시간/주파수 영역 신호의 독자성(non-correlation) 특성으로 인해 신호와 잡음을 구분하여 분석할 수 있다. 정합 필터 연산

으로 인해 신호는 펄스폭과 대역폭에 의한 이득만큼 증폭되어 출력되며, 잡음 신호는 고유의 랜덤(random) 특성으로 인해 신호 대비 증가하지 않는다.

이러한 과정으로 출력되는 응답 신호는 SAR 시스템을 구성하는 RF 소자 및 RF 시스템 경로 특성에 의해 영향을 받는다. 즉, RF 시스템 경로에 대한 진폭 및 위상 특성이 불완전할 경우 영상 품질에 직접적인 영향을 주는 IRF 특성을 열화시키지만, 시스템 경로 불완전성에 의한 열화는 사전/사후 신호처리를 통해 일부 보상이 가능하다. 일반적으로 SAR 시스템의 경우 자체적인 사전 보상 기능이 탑재되며, 수신 신호에 대해서는 내부 검·보정을 통하여 사후 보상을 수행한다. 그러나 RF 장치(RFU, RF unit)의 주파수 합성부에서 주로 발생하는 위상 잡음 성분은 짧은 시간에 변화하는 특성을 갖기 때문에 신호처리를 통해 보상하기가 매우 어렵다.

위와 같은 이유로 위상 잡음은 영상 품질에 직접적인 영향을 줄 수 있으며, 주로 ISLR 특성의 열화로 확인된다. 위상 잡음 특성은 보상이 어려운 만큼 RFU를 개발함에 있어 RF 시스템 모델에 대한 위상 잡음의 사전 분석이 요구된다. 이러한 분석에는 설계된 시스템 모델에서 발생 가능한 위상 잡음 특성 추정과 이 특성이 SAR 시스템 레벨의 성능에 미치는 영향을 파악하는 부분이 포함된다.

본 논문에서는 고해상도 광역 관측을 지원하는 고성능 RFU를 효과적으로 개발하기 위한 과정 중 일부인 RF 시스템 모델의 위상 잡음을 고려한 타당성 조사(feasibility study)와 이에 대한 분석 및 시험 결과를 제시한다. 세부적으로는 RF 시스템 모델을 설계하고 위상 잡음 특성을 사전 분석하며, 설계 모델의 구현 및 실제 측정을 통하여 해당 시스템 모델이 사전 분석된 위상 잡음 규격에 맞도록 구현이 가능한 시스템인지 확인한다.

II. 분석 및 설계

2-1 IRF 특성 정의

SAR 시스템은 LFM chirp 신호를 이용해 송수신하며, 정합 필터를 이용해 펄스 압축 후 SAR 성능의 주요 평가 항목 중 하나인 IRF 특성을 확인한다. 정합 필터는 레이다 신호 수신 간 SNR 특성을 최대화할 수 있는 신호처리

방법이며 필요에 따라 아날로그 및 디지털 기법이 적용된다. 그림 1에 정합 필터에 대한 특성을 나타내었다.

고해상도 영상을 획득하기 위해선 송수신 장치의 대역폭(BTX)과 Doppler 대역폭(BD) 두 가지 항목에 대해 고려하여야 한다. 이때, 위 두 가지 파라미터는 IRF 특성에 영향을 미치며, 그림 2과 같이 IRF 특성은 아래 3가지 주요 항목으로 나누어 range 및 azimuth 관점으로 분석 및 평가한다.

2-1-1 SR

영상의 해상도를 표현하며 Sinc 함수 특성으로 인해 IRF 함수의 3 dB 주엽폭은 송수신 대역폭에 의해 결정된다. Range 방향의 해상도는 SAR 시스템의 송수신 대역폭(BTX)에 영향을 받으며, azimuth 방향의 해상도는 수집된

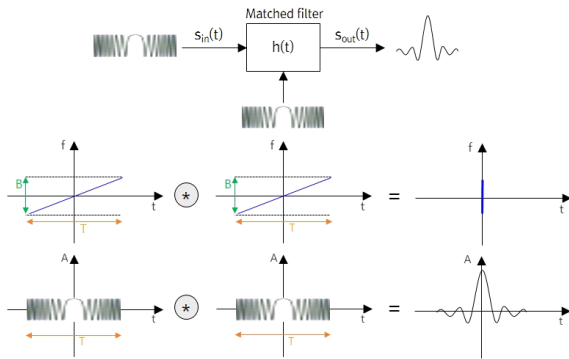


그림 1. 정합필터(matched filter) 특성
Fig. 1. Characteristics of the matched filter.

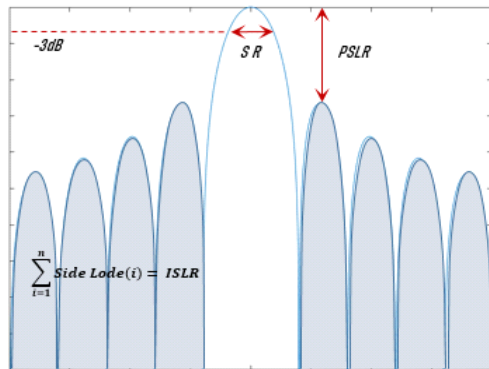


그림 2. LFM IRF 특성
Fig. 2. characteristics of LFM impulse response function.

신호의 Doppler 대역폭(BD)에 의해 결정된다^[4].

2-1-2 PSLR

식 (1)과 같이 IRF 함수의 주엽 크기 대비 첫번째 부엽의 비(ratio)를 나타내며, 송수신 신호의 크기 및 위상의 ripple 특성에 영향을 받는다.

$$\text{PSLR (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{sidelobe@1st}}}{P_{\text{main}}} \right) \quad (1)$$

사용하고자 하는 주파수 대역 내 하드웨어적 특성이 송수신 신호의 포락선을 구현하며, 하드웨어 영향을 최소화하기 위해 전치 왜곡(pre-distortion) 기법을 사용하여 송신 신호의 ripple 및 기울기를 최소화한다. 또한, 수신 신호의 경우 지상 시험을 통해 확보한 데이터를 활용, 후처리(post-processing) 과정을 통해 하드웨어 영향을 제거한다.

2-1-3 ISLR

식 (2)과 같이 IRF 함수의 주엽 크기 대비 전체 부엽의 비를 나타내며, ISLR은 하드웨어에서 사용하는 주파수의 안정도(allan variance)에 영향을 받는다. 송신기의 주파수 안정도 및 수신기의 LO 안정도를 확보하기 위해 고성능 PLL 및 OCXO 특성을 요구하며, 이를 통해 뛰어난 ISLR 특성을 확보할 수 있다.

$$\text{ISLR (dB)} = 10 \log \left(\frac{\sum P_{\text{sidelobe}}}{P_{\text{main}}} \right) \quad (2)$$

SAR 데이터 획득 시, 수신 안정도 특성이 제어 장치로 전달되는 데이터에 반영되기 때문에, 하드웨어적 영향(LO 안정도)을 제거할 수 없어 후처리 시 Window 함수를 이용해 ISLR 성능 개선을 시도한다. 위와 같은 특성으로 인해 RF HW 설계 시 안정적인 주파수 안정도를 획득하는 것이 주요하며 설계된 주파수 안정도의 영향성에 대해 반드시 고려하여야 한다.

2-2 Range/Azimuth ISLR 분석

I 장에서 언급한 바와 같이, ISLR 분석을 위해선 SAR HW에서 사용하는 신호의 안정도가 중요하다. 이러한 신

호의 안정도를 나타내는 주요 파라미터는 주파수 영역과 시간 영역에서 수학적으로 표현할 수 있으며, 주파수 영역에선 위상 잡음을 이용해 안정도를, 시간 영역에선 Allan variance를 이용해 안정도를 나타낸다. 위상 잡음과 Allan variance의 관계를 식 (3)에 표현하였다.

$$\sigma^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \sin^2(\pi\tau f) \left[\frac{\sin\pi\tau f}{\pi\tau f} \right]^2 df \quad (3)$$

σ^2 : Allan variance $S_y(f)$: Phase noise
 f_h : Cut-off frequency τ : Measurement time

Allan variance를 이용해 안정도를 분석할 경우 cut-off 주파수와 위상 잡음의 특성 정의가 필요하다. Range 관점의 경우 cutoff 주파수는 SAR 운용 파라미터를 이용해 정의할 수 있으며, 이를 그림 3에 표현하였다.

점 표적에 대해 range 방향의 압축은 PRI 마다 이루어지며, 펄스폭(τ) 내부에서 발생하는 송수신 신호에 하드웨어적인 에러가 발생해 IRF 특성을 열화시키는 원인이 된다. 그림 3과 같이, 펄스폭(τ)이 커질수록 송수신 신호의 위상 및 크기, 즉, within pulse 안정도가 열화된다는 것을 알 수 있으며 SAR 운용 파라미터를 통해 최악 경우(worst case)로 분석을 수행할 경우 allan variance 적분 변수는 다음과 같이 정의한다.

- $f_{\min} = \frac{1}{\tau}$
- $f_{\max} = B_{TX}$

따라서, range 관점의 allan variance는 운용 주파수의 위상 잡음, 펄스폭 그리고 대역폭에 의해 결정되며, 식 (4)를 이용해 range 방향의 ISLR 값을 계산할 수 있다^[6].

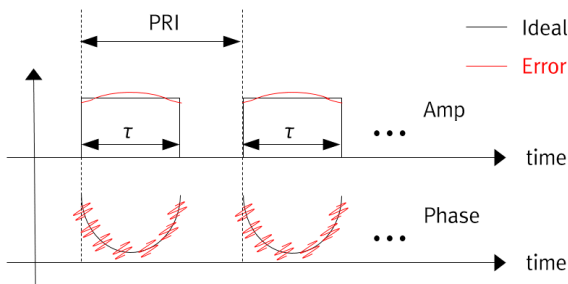


그림 3. Range pulse error 발생 과정

Fig. 3. The process of pulse error on range direction.

$$\Delta ISLR_{Range}(dB) = 20 \log \sum_{i=1}^n \sigma_i^2(\tau) \quad (4)$$

Azimuth 방향의 압축은 수신된 신호의 Doppler 정보를 이용해 이루어지며, 이를 그림 4에 간략히 나타내었다.

점 표적에 대한 Doppler 정보를 획득하기 위해서는 고려해야 할 많은 파라미터가 존재하지만, 하드웨어적인 영향성만 고려할 경우 range 방향과 달리 PRI 마다 발생하는 펄스간의 안정도가 중요시된다.

이를 최악 경로 고려하여 분석할 시 적분 변수는 아래와 같이 정의된다.

- $f_{\min} = \frac{1}{\tau_t}$ $\tau_t = travelling \ time$
- $f_{\max} = \frac{1}{\tau_w}$ $\tau_w = pulse \ width$

펄스 간 안정도는 신호를 송수신하는 주파수 원(source)의 안정도가 주요 영향을 미치게 되며, azimuth 관점의 allan variance는 주파수 원의 위상 잡음, 펄스폭 그리고 SAR 운용 파라미터에 의해 결정된다.

위 파라미터와 식 (5)를 이용해 Azimuth 방향의 ISLR 값을 계산할 수 있다^[6].

$$\Delta ISLR_{Azimuth}(dB) = 20 \log \sigma_s^2(\tau) \quad (5)$$

2-3 RF unit Block 설계

전통적인 SAR 시스템(TerraSAR-X)은 TR 모듈을 포함한 안테나 장치, 송수신 장치, 제어 장치로 나누어져 있

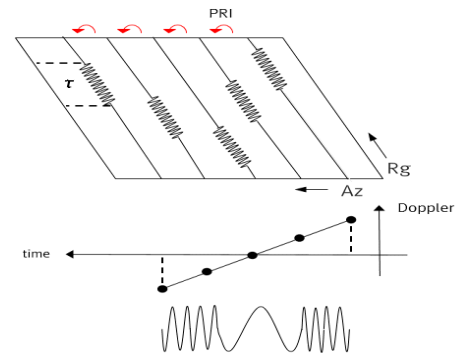


그림 4. Azimuth pulse error 발생 과정

Fig. 4. The process of pulse error on azimuth direction.

며^[7], 표 1에 송수신 장치의 기능 및 역할을 간략히 나타내었다. 송수신 장치는 발진기(STALO)를 보유해 위성 운용 환경에서 안정적인 기준 신호를 생성할 수 있으며, 이를 활용해 제어 장치에 필요한 clock 신호를 제공한다. 제어 장치는 송수신 장치로부터 수신한 clock 신호를 활용해 변조신호를 생성하며, 송신부는 상향 주파수로 변환 및 주파수 대역폭을 확장 후 안테나 장치로 광대역 신호를 전달한다. 광대역 신호는 지상의 관심 영역으로 방사된 후 수신부의 주파수 하향 변환 기능을 통해 저주파 신호가 제어 장치로 전달된다. 이러한 기능적 정의를 고려하여 본 논문의 송수신 장치를 설계하였으며, 위성 HW 설계 시, 방사선 강건성, 진동/충격, 운용 온도 등 발사 및 궤도 환경에서의 스트레스 또한 고려해 설계하여야 한다.

위 요소들을 모두 고려하여 제작된 우주급 소자는 상용 부품(COTS, component off-the-shelf) 대비 부피가 크기 때문에 전체 하드웨어의 크기를 소형화할 수 있는 설계가 중요하며, 이를 고려한 block diagram을 그림 5에 나타내었다.

Range 해상도를 확보하기 위해선 넓은 대역폭의 신호를 송수신하여야 하며, DAC에서 광대역의 신호를 생성할 경우 SNR 열화 및 사전 왜곡 기법 사용 시 FPGA resource 소모가 크기 때문에, RF 송신부에 주파수 체배기($\times 4$)를 활용해 대역폭을 확장하였다.

수신부는 heterodyne 구조를 사용하여 하드웨어 복잡도 및 Mixer LO로 인한 ISLRRange 영향성을 최소화하였다.

2.4 위상 잡음 모델링

그림 5에 나타낸 바와 같이, SAR 송수신 장치에서 사

표 1. SAR 탑재체 송수신 장치의 역할

Table 1. The function of RF unit on SAR payload.

	Functional definition on RF unit
Transmitter	<ul style="list-style-type: none"> Frequency up-conversion Bandwidth stretching Driving RF input power for antenna
Receiver	<ul style="list-style-type: none"> Frequency selection Frequency down-conversion Gain control following operating mode
Frequency synthesizer	<ul style="list-style-type: none"> ADC/DAC clock generation from STALO LO generation for down conversion

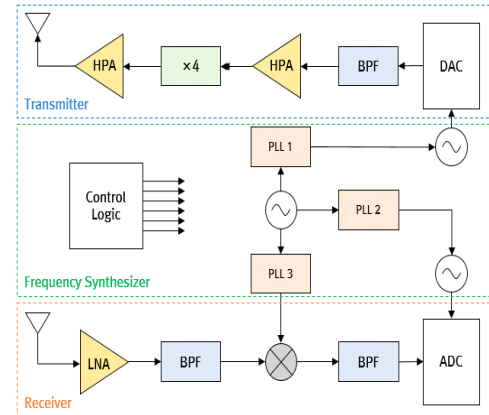


그림 5. 송수신 장치의 block diagram

Fig. 5. Block diagram of RF unit.

용되는 주파수는 Tx_Out, PLL1, PLL2 그리고 PLL3 총 4가지이다. 송신부 출력 주파수(Tx_Out)에 대한 위상 잡음은 식 (6) 및 식 (7)에 의해 결정된다.

$$N = \frac{f(Out_{TX})}{f(Clock_{DAC})} \quad (6)$$

$$S_{TX}(f) = 20\log(N) + S_{PLL}(f) \quad (7)$$

PLL 위상 잡음은 STALO, PFD, loop filter, VCO에 모두 영향을 받아 주파수 영역별 모델링^[8]이 필요하다.

위 내용을 기반으로 MATLAB을 이용해 모든 주파수의 위상 잡음을 유추할 수 있으며 시뮬레이션을 통해 추출한 위상 잡음 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6에 분석된 위상 잡음을 기반으로 allan variance 및 jitter 분석값을 도출하였으며, 표 2에 간략히 정리하였다. 운용 주파수가 가장 높은 Tx에서 가장 큰 allan variance를 확인할 수 있으며, PLL을 이용한 LO 및 clock 주파수 생성 시 낮은 allan variance를 갖는 것을 확인할 수 있다. 설계된 주파수 합성부의 위상 잡음을 바탕으로 송신부 및 수신부에 대한 간략한 시뮬레이션을 수행하여 SNR을 확인하였으며, 송신 SNR의 경우 X 대역에서 72.8 dB, 수신 SNR의 경우 UHF 대역에서 56.7 dB을 확보하였음을 그림 7에서 확인할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 설계된 송수신 장치가 정상 동작하는 것을 확인하였으며, 각 주파수별로 분석된 안정도 파라미터를 이용해 송수신 장치에서 발생하는 ISLR 열화 정도를 계산하였다. 이를 그

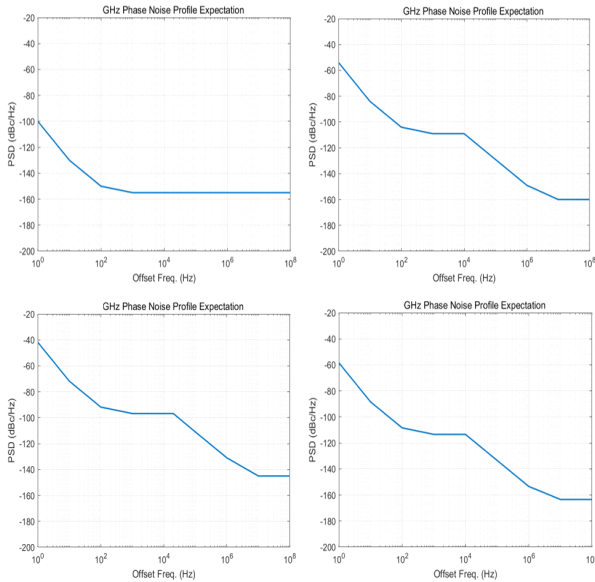


그림 6. 송수신 장치의 위상 잡음 시뮬레이션
Fig. 6. Phase noise simulation on RF unit.

표 2. 송수신 장치의 경로별 안정도 분석 결과
Table 2. Stability analysis result for each HW path.

Item	Tx	STALO	PLL1	PLL2	PLL3
Phase jitter	0.63 deg	0.63 deg	0.13 deg	0.12 deg	0.8 deg
Allan variance	2.25e-08	3.24e-11	2.25e-09	3.5e-09	3.37e-09

림 8에 나타내었다. 이상적인 IRF 함수와 비교하여 분석한 결과 range, azimuth ISLR 모두 열화 정도가 미미한 것으로 확인되었으며, 하드웨어적으로 SAR 탐재체 IRF 성능에 큰 영향이 없음을 확인하였다.

III. 결과 및 비교

II 장의 분석 결과를 기반으로 하드웨어를 제작하였으며, 송수신 장치의 형상은 그림 9에 나타내었다. 제작된 송수신 장치의 IRF 영향성을 확인하기 위해 위상 잡음을 측정하였으며, 그림 10에 분석된 수치와 측정된 수치를 오버랩하여 제시하였다.

상온(+25℃) 조건에서 측정을 수행하였으며 실제 측정된 위상 잡음은 loop BW 영역에서 분석 결과와 일부 차이가 존재하는 것을 확인하였다. 표 3에 측정된 성능을

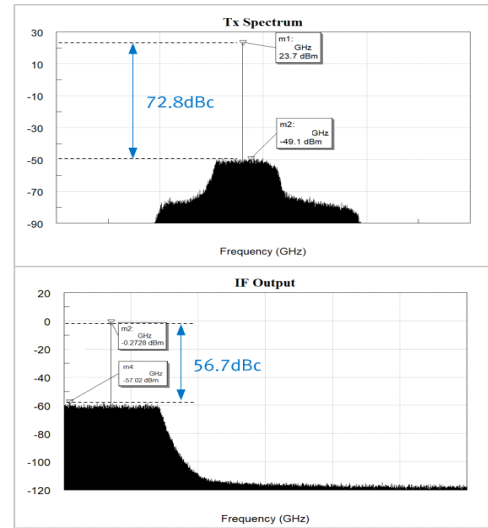


그림 7. 송수신 장치의 Tx/Rx SNR 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result of Tx/Rx SNR on RF unit.

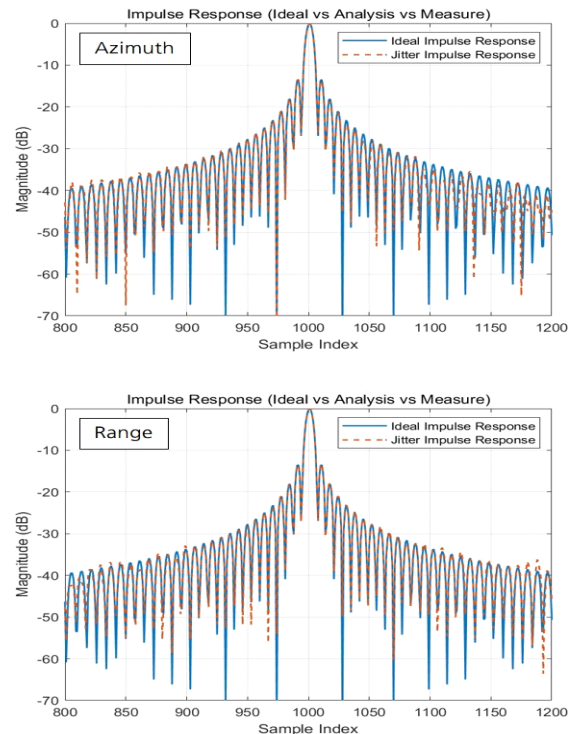


그림 8. ISLR (range/azimuth) 분석 결과
Fig. 8. Analysis results of ISLR (range/azimuth).

기반으로 송수신 장치의 경로별 안정도를 제시하였으며, 그림 10의 위상 잡음을 보유한 LO 신호를 이용해 송수신

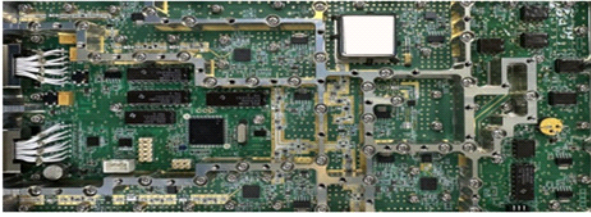


그림 9. 제작된 SAR 송수신 장치 형상
Fig. 9. Configuration of the manufactured SAR RF unit.

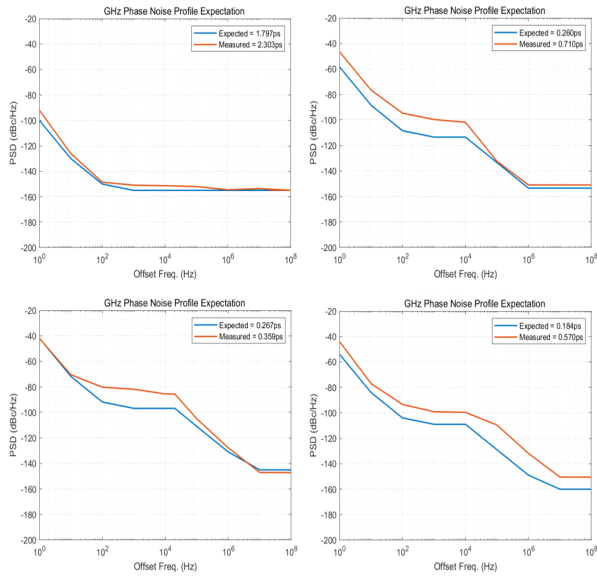


그림 10. 위상 잡음 측정 결과
Fig. 10. Test result of phase noise on RF unit.

장치의 주파수 상향/하향 변환 출력 성능 확인하였다. 그림 11과 같이 Tx/Rx SNR 측정을 수행하였으며, Tx SNR은 67.3 dB로 확인되었다. 시뮬레이션 대비 약 5.5 dB 열화가 발생하였으며 이는 ($\times 4$)채배 과정 중 발생한 누설 신호들과 상호 변조 신호가 발생해 나타난 차이로 추정된다. Rx SNR은 61.4 dB로 확인되어 시뮬레이션과 비교 시 약 4. dB 개선된 성능을 보였다. 이는 수신 경로 시뮬레이션 시 사용한 불요파 표(spurious table)에서 발생한

표 3. 송수신 장치의 경로별 안정도 측정 결과
Table 3. Stability test result for each HW path.

Item	Tx	STALO	PLL1	PLL2	PLL3
Phase Jitter	1.94 deg	0.81 deg	0.39 deg	0.3 deg	1.05 deg
Allan Variance	6.87e-09	4.14e-11	6.87e-09	8.5e-09	4.5e-09

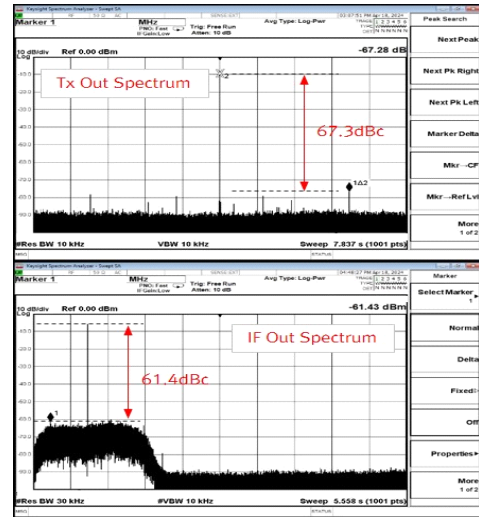


그림 11. Tx/Rx SNR 측정 결과
Fig. 11. Test result of Tx/Rx SNR on RF unit.

차이로 유추된다. 데이터 시트에서 제공하는 불요파 표는 단일 주파수를 기준으로 측정된 결과를 제시하기 때문에 광대역 수신기에 적용 시 실제 사용 주파수가 일부 상이하여 합리적인 수준의 불요파 전력 차이로 판단된다.

그림 10 및 그림 11의 측정된 출력 성능을 기반으로 송수신 장치의 IRF 특성을 그림 12에 제시하였으며, 시뮬레이션 기반 송수신 장치의 안정도와 실제 제작된 송수신 장치의 안정도로 인한 IRF 성능 열화 정도가 유사함을 확인하여 RF 시스템 모델 분석 결과의 타당성과 구현성에 대해 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문은 RF 시스템 모델을 설계하고 사전 분석된 위상 잡음 특성을 기반으로 하드웨어를 제작 및 검증하였다. RF 시스템 모델 분석 결과와 하드웨어 제작 결과에 일부 차이가 존재하지만, 합리적인 수치의 차이로 판단되며 이에 대한 내용을 III장에 기술하였다. 또한, 영상 레이다 성능 평가 항목 중 하나인 IRF 특성에 대해 하드웨어적 성능을 이용해 송수신 장치의 영향성을 확인하였으며, RF 시스템 모델 분석 결과와 하드웨어 제작 결과를 활용한 IRF 특성이 이상적인 IRF 특성과 유사함을 확인하여 RF 시스템 모델 및 하드웨어의 타당성을 확인하였다. 따

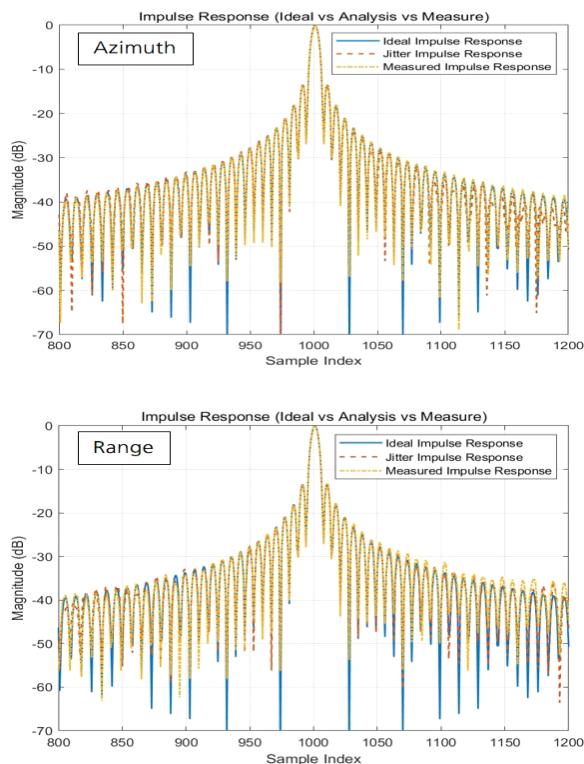


그림 12. ISLR(range/azimuth) 결과 비교

Fig. 12. Comparison of ISLR (range/azimuth) result.

라서, 본 논문을 통해 검증된 송수신 장치는 고해상도 위성 SAR 시스템 적용에 적합한 것으로 판단된다.

References

[1] 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.

- [2] D. Mapelli, P. Guccione, D. Giudici, M. Stasi, and E. Imbembo. "Genererlization of the synthetic aperture radar azimuth multi-aperture processing scheme-MAPS," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 17, p. 3170, Aug. 2024.
- [3] F. Bordonì, M. Younis, E. Makhoul Varona, N. Gebert, and G. Krieger. "Performance investigation on scan-on-receive and adaptive digital beamforming for high-resolution wide-swath synthetic aperture radar," in *International ITG Workshop of Smart Antennas*, Berlin, Feb. 2009, pp. 114-121.
- [4] G. W. Carrara, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [5] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Boston, MA, Artech House, 2005.
- [6] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing*, Hoboken, NY, John Wiley & Sons, 2005.
- [7] D. Miller, M. Stangl, and R. Metzger, "On-ground testing of TerraSAR-X instrument," in *European Conference on Synthetic Aperture Radar(EUSAR) 2006*, Dresden, 2006, May pp. 16-18.
- [8] W. J. Riley, *Handbook of Frequency Stability Analysis*, Boulder, CO, National Institute of Standards and Technology, 2008.

류 성 헌 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7621-9875>



2021년 6월~현재: 한화시스템 우주연구
소 전문연구원
[주 관심분야] SAR RF 성능 분석, RF
Power Amplifier, LTCC 모듈 설계

이 창 현 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6931-7925>



2020년 3월~현재: 한화시스템 우주연구
소 전문연구원
[주 관심분야] SAR RF 성능 분석, RF
Power Amplifier, 안테나 장치

안 창 영 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7829-7866>



2023년 1월~현재: 한화시스템 우주연구
소 전문연구원
[주 관심분야] 위성 SAR, SAR 탑재체,
SARP, HRWS

윤 성 식 [한화시스템/팀장]

<https://orcid.org/0000-0002-5764-5403>



2010년 8월: 한국항공대학교 항공전자공
학과 (공학사)
2013년 2월: 한국항공대학교 항공전자공
학과 (공학석사)
2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자공
학과 (공학박사)
2018년 3월~현재: 한화시스템 우주연구
소 위성시스템 2팀 팀장
[주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템