

위성 탑재 영상레이다 검보정 신호를 이용한 내부 지연 측정 기법

차경현*, 이종환**¹, 김세영**²

A Methodology to Measure the Internal Delay of the Spaceborne SAR Instrument using Calibration Pulses

Kyung-Hyun Cha*, Jong-Hwan Lee**¹, and Se-Young Kim**²

요 약

위성체에 탑재되는 영상레이다는 지상으로 방사된 레이더 신호를 안테나를 통해 수신하여 영상을 처리하는 시스템이다. 이때 영상레이더 내부 지연은 거리 방향 표적 위치 정확도에 영향을 끼치며, 위치 정확도 분석을 위해 정확한 내부 지연 산출이 필요하다. 기존 내부 지연 측정 방법은 시험 구성 변경에 따라 송신 및 수신 경로를 각각 측정해야 하므로 번거롭고, 시간이 많이 소모되는 문제가 있었다. 문제 해결을 위해 본 논문에서는 검보정 신호를 이용하여 송수신경로 특성함수의 선형 위상을 통해 내부 지연을 산출하는 기법을 제시하였다. 또한 지상시험에서 기존 내부 지연 측정 방법과 비교하여 무결성을 검증하였고, 위치 정확도 규격이 만족함을 확인하였다.

Abstract

The Pixel Localization Accuracy(PLA) accuracy in range direction is related to the internal delay of Synthetic Aperture Radar(SAR) and the delay shall be estimated for exact radar timing. The conventional method for the internal delay is to measure the respective Tx and Rx path and this method requires a lot of time and effort. So, this paper proposes a methodology to easily measure the internal delay using calibration pulses which come out of TxCal, RxCal and ShortCal paths implemented in the SAR instrument. The phase of each calibration pulses is evaluated and the internal delay is retrieved from the linear phase calculation of Peak power receive Gain(PG) product which is equivalent to the Tx and Rx main path signal. By this methodology, the internal delay is evaluated in the on-ground test and the methodology is verified compared to the conventional method. Also, its accuracy is much higher than the PLA requirement.

Keywords

SAR, internal delay, calibration, linear phase, PLA

* 국방과학연구소 연구원(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6853-3864>

** 국방과학연구소 책임연구원

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0001-5032-4378>

- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-5112-3524>

• Received: Aug. 11, 2021, Revised: Aug. 24, 2021, Accepted: Aug. 27, 2021

• Corresponding Author: Kyung-Hyun Cha

Defense Space Technology Center, Agency for Defense Development, YuSeong
P.O. Box 35, Daejeon, 34186, Korea

Tel.: +82-42-821-2932, Email: chagyconghyeon@add.re.kr

I. 서 론

위성체에 탑재되는 영상레이다(SAR, Synthetic Aperture Radar)는 칩(Chirp) 신호를 지상으로 방사하고, 표적으로부터 반사된 신호를 안테나로 수신하여, 레이다 신호를 위상이 일치하도록 코히어런트(Coherent)하게 합성함으로써 안테나의 개구면(Aperture)의 크기를 작게 유지하면서도 방위 분해능을 향상시키며 영상을 처리하는 레이다 시스템이다[1]. 이때, 영상에서 표적 위치에 대한 정확도(PLA, Pixel Localization Accuracy)는 전파가 송신되고 수신되는 전체 경로에서의 장치 타이밍(Timing), 위성체 고도 및 입사각 관련 기하 구조(Geometry), 위성체 속도(Velocity), 외부 대기 환경 요인에 의한 전파 지연(Propagation delay), 그리고 장비의 내부 지연(Internal delay) 등에 의해 결정된다[2][3]. 특히, 장비의 내부 지연은 영상에서 표적의 거리 방향 위치에 영향을 끼치며, 일반적으로 지상에서 시험 및 측정을 통해 정량화하고 레이다 신호의 발생이나 타이밍 운용 시 보상해준다. 그리고 그 정확도(오차)는 영상에서 표적의 위치 정확도를 산출하는 기여 요소(Budget)로 관리한다. 통상적으로 대형 능동위상배열 안테나를 적용하는 위성 탑재 영상레이다는 레이다 신호의 분배 및 수집을 위한 RF(Radio Frequency) 송수신 경로가 길어짐에 따라 상당 수준의 내부 지연이 발생한다. 이때 이러한 내부 지연 고려 없이 영상레이다를 운용할 경우 영상품질이 떨어지거나, 원하는 지역의 영상 촬영이 이뤄지지 않는 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 정확한 내부 지연 값을 레이다 타이밍 변수에 반영한 모드 운용이 필요하다[4].

기존에 내부 지연을 측정할 경우 송신, 수신경로를 각각 따로 측정하므로 많은 시간이 소요되며, 시험 케이블 및 장치 내부 지연 요소 등을 제거해주는 작업이 필요하다. 또한, 위성에 탑재되는 영상레이다의 경우 우주 환경에서의 열 영향성 판단을 위한 환경시험을 수행하는데, 환경시험 중에는 시험 구성 변경이 어려워 기존의 내부 지연 측정 방법으로는 열 영향성을 판단하기 어렵다.

본 논문에서는 기존의 소모적이고 제한성 있는

내부 지연 측정 방법이 아닌, 영상레이다 장비에 내재하는 검보정경로(TxCal, RxCal, ShortCal)를 통해 얻어진 신호를 이용하여 내부 지연을 추출하는 방법을 소개하고, 지상시험 간 획득한 영상레이다 검보정 신호로부터 내부 지연 값과 그 정확도를 도출하였다.

II. 영상레이다 검보정경로를 이용한 내부 지연 측정

2.1 내부 지연 측정 필요성

그림 1은 영상레이다를 구성하는 장치들의 송수신 경로 및 검보정경로를 나타내며, 경로는 각각 구분하여 송신(실선), 수신(점선)경로와 검보정(일점쇄선)경로를 나타낸다. 송신경로(TX path)는 칩 신호발생기(Chirp generator)에서 생성된 레이다 신호가 RF 송신장치(RF transmitter), 송수신 전단장치(Frontend interface)를 거쳐 안테나를 통해 방사되는 경로이며, 수신경로(RX path)는 안테나를 통해 수신한 신호가 역으로 송수신 전단장치, RF 수신장치(RF receiver)를 거쳐 저장장치(Receiver unit)에 신호가 저장되는 경로이다. 검보정경로는 영상 생성 시 장비 내부의 영향성 확인을 위한 레플리카(Replica) 형성 경로이며, 각 경로에 해당하는 송수신경로를 통과 후에 보정경로를 통과하는 경로이다[5]-[7].

송수신경로를 통해 송신된 신호는 표적을 맞고 되돌아오는 신호를 안테나로 수신하는데, 이때 표적까지의 거리를 제외한 신호의 지연시간이 장비의 내부 지연이다. 영상레이다는 운용 환경 및 조건에 따라 운용 파라미터를 설정하며, 파라미터를 기반으로 산출된 타이밍 변수는 영상레이다 장치들의 송수신 게이트(Gate) 동작 위치 및 간격, 반복 구간 등을 제어한다. 이때 타이밍 운용에 영향을 주는 요소 중에 하나가 바로 내부 지연이며, 타이밍 변수를 통해 내부 지연의 영향성을 반영해주는 것이 필요하다. 내부 지연 영향성이 타이밍에 반영되지 않을 경우에는 위치정확도 성능이 떨어질 수 있어, 사전에 지상시험을 통해 반영해주는 것이 필요하다.

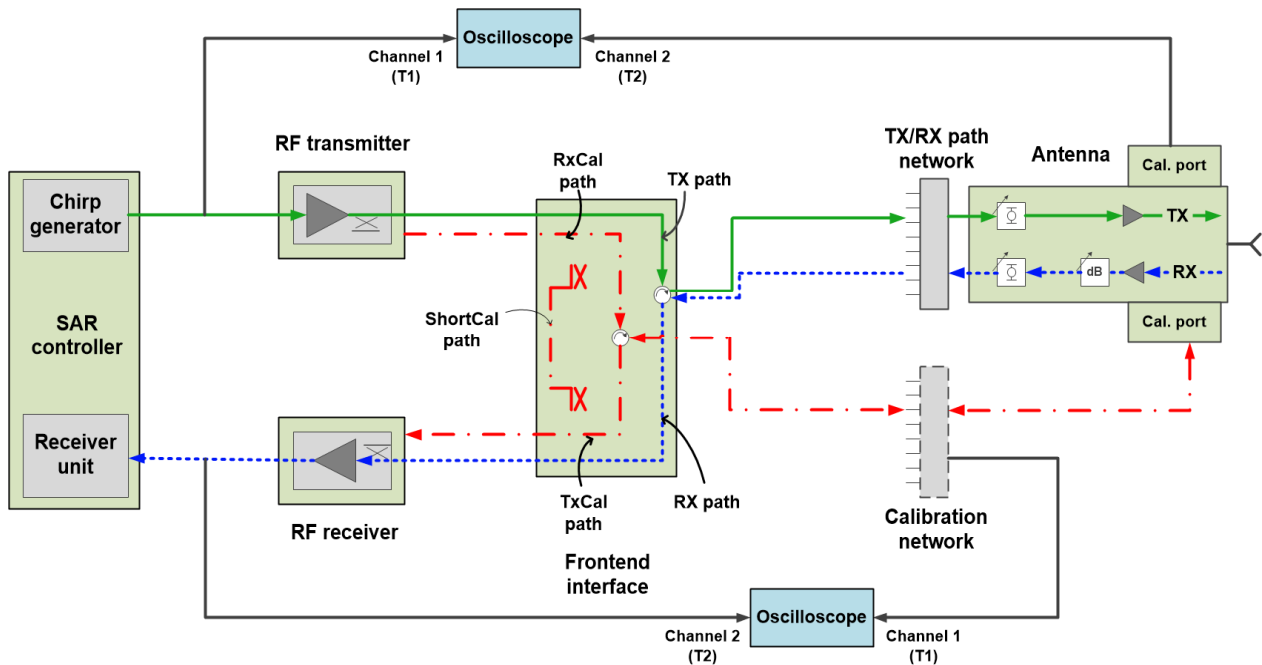


그림 1. 영상레이다 송수신경로 및 검보정경로 구성도

Fig. 1. Overall SAR architecture with main signal path and internal calibration paths

2.2 기존 내부 지연 측정 방법

기존에 내부 지연 측정할 경우에는 시험 구성 변경에 따라 검보정경로를 통해 계측기로 측정하였다. 검보정 신호의 경로는 내부의 경로에 따라 검보정 송신경로(TxCal), 검보정 수신경로(RxCal), 검보정 내부경로(ShortCal)로 구분된다.

송신경로의 내부 지연을 측정할 경우 TxCal 경로를 통해 측정하며, TxCal 경로는 그림 1에서 제어장치 칩 신호발생기에서 발생된 신호가 송신경로를 지나 검보정 송신경로를 통과하는 경로이다. 칩 신호발생기에서 송신된 신호는 디바이더(Divider)를 통해 분기되어 송신경로와 계측기(Oscilloscope) 채널 1 입력으로 사용되며, 해당 입력 신호를 기준으로 트리거(Trigger)를 설정한다. 송신경로를 지난 TxCal 신호는 안테나 검보정 포트(Cal. port)로 출력되며, 해당 출력 신호는 검보정 송신경로와 계측기 채널 2 입력으로 사용된다. 계측기에서 채널 2(T2)와 채널 1(T1)에서 측정된 신호 수신 시간 차이(T2-T1)에서 케이블 및 장비 내부의 영향성을 제외 해주면 송신경로의 내부 지연이 된다.

수신경로는 RxCal을 통해 내부지연을 측정한다.

RxCal은 칩 신호발생기에서 발생된 신호가 RxCal을 지나 수신경로를 통과하는 경로이다. RxCal을 지난 신호는 검보정경로 네트워크(Calibration network)에서 계측기 채널 1과 검보정 포트에 분기된다. 계측기 채널 1(T1) 입력 신호는 수신경로 측정을 위한 트리거로 설정된다. 이후 검보정경로 네트워크를 통과한 RxCal 신호는 수신경로를 통과하며, RF 수신장치와 저장장치 사이에 디바이더를 통해 계측기 채널 2(T2)와 저장장치로 수신된다. 채널 2(T2)와 채널 1(T1) 신호 수신 시간(T2-T1)에 수신경로에 해당하지 않는 케이블의 내부 지연을 제외하여 수신경로의 내부 지연을 산출한다. 상기와 같이 개별적으로 내부 지연을 측정할 경우 송신 및 수신경로에 대해 각각 측정이 이루어져야 하며, 측정 경로에 따라서 시험 구성 변경이 필요하다. 또한 위성 탑재 영상레이다 경우 우주 환경에 따른 환경시험 수행 필요한데, 환경시험 중에는 시험 구성 변경이 불가하여 해당 방법으로는 환경시험에서 내부 지연 측정이 어렵다. 이처럼 송수신경로를 각각 개별적으로 측정할 경우 번거롭고, 소모적인 작업을 수행해야 하므로 시험 구성 변경 없이 검보정 신호를 이용한 내부 지연 기법을 다음 장에 제시하였다.

III. 내부 지연 측정 개선 기법

해당 장에서는 영상레이다 검보정경로를 통해 획득한 신호를 이용하여 내부 지연을 산출하는 기법을 제시하며, 해당 기법에 대한 순서도는 그림 2와 같다. 먼저 검보정경로를 통해 제어장치 저장장치에 획득한 신호에 대하여 각각 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 수행한다. 검보정경로를 통해 수신된 신호는 시간 도메인(Time domain)에서 수신 구간(Sampling window)내에 신호별로 미세한

수신 시간이 차이가 발생하며, 이러한 차이를 없애기 위해 FFT를 수행한다.

FFT 수행 후에는 송수신경로의 특성을 나타내는 특성함수(PG product; Peak power receive Gain product) 산출이 필요한데, 이때 검보정 신호를 통해 PG product 산출이 가능하다[8]. 검보정 경로에 관한 개념적 구성도는 그림 3과 같으며, 아래와 같이 검보정 경로에 따라 신호의 크기와 위상으로 표현하였다.

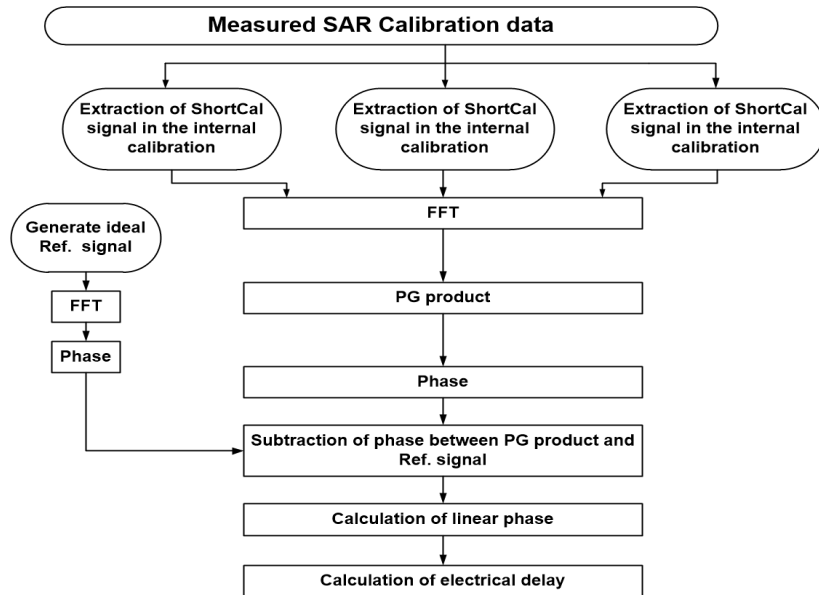


그림 2. 내부 지연 개선 기법 순서도

Fig. 2. Flow diagram of a improved methodology to measure internal delay

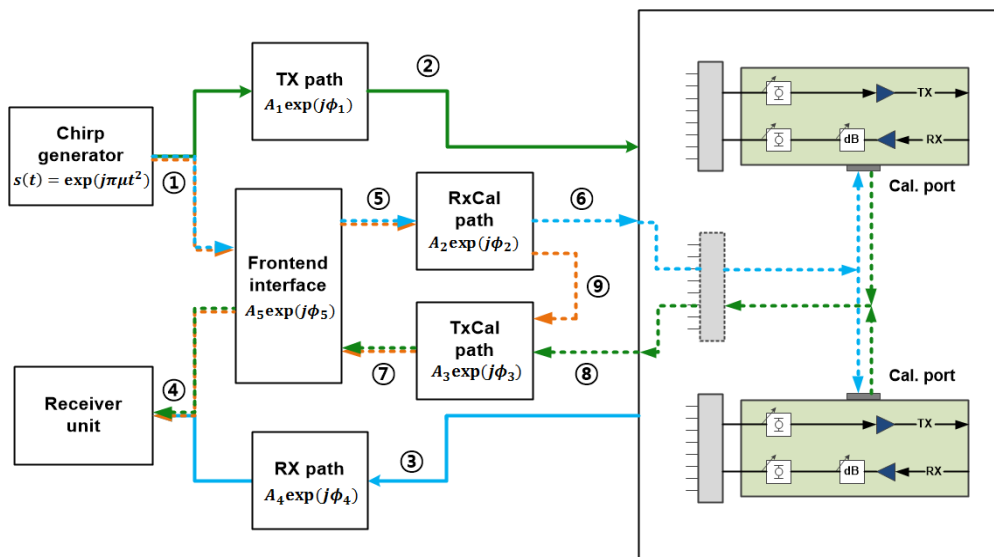


그림 3. 영상레이다 검보정 경로 개념도

Fig. 3. Conceptual diagram showing SAR internal calibration data acquisition in terms of signal path

1) TxCal

- ① → ② → ⑧ → ⑦ → ④

2) RxCal

- ① → ⑤ → ⑥ → ③ → ④

3) ShortCal

- ① → ⑤ → ⑨ → ⑦ → ④

검보정경로를 통해 저장장치에서 획득한 신호는 식 (1)~(3)과 같으며, TxCal, RxCal에서 ShortCal를 제외할 경우 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)에서 송수신경로 아닌 잔여 경로 신호(Residual term)를 제거해줄 경우 식 (5)와 같이 PG product 산출이 가능하다. 잔여 경로 신호는 그림 3에서 송수신 진단장치와 검보정 송신, 수신경로 내부를 통과하는 경로로써 장치 개발 시 시험을 통해 해당 경로의 특성을 획득하는 것이 가능하다. 검보정 신호를 통해 상기와 같이 송수신경로의 특성을 나타내는 PG product 산출 후에는 해당 신호와 이상 신호(Ideal signal)의 위상 차이를 산출한다. 여기서 이상 신호는 검보정경로 신호와 신호 특성은 동일하나 내부 지연이 없는 신호를 말한다. 이상 신호는 장비 내부 경로에 따른 내부 지연이 없어 주파수에 따른 위상 변화량이 일정하므로 해당 신호를 기준으로 PG product 신호와 위상을 비교한다. 그림 4에서 보듯이 이상 신호는 주파수에 따른 위상 변화가 일정한 반면 PG product 신호의 경우 주파수에 따른 위상 변화가 생기는 것을 확인할 수 있다. 따라서 식 (6)과 같이 PG product 신호와 이상 신호와의 주파수에 따른 위상 변화량이 송수신경로의 내부 지연을 나타낸다.

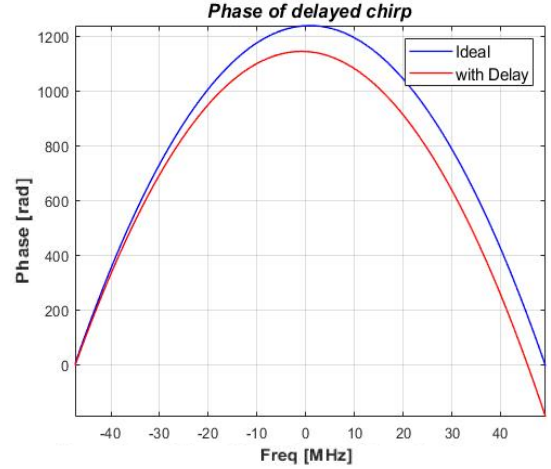


그림 4. 이상 신호 및 내부 지연 신호 위상 변화
Fig. 4. Phase variation of ideal signal and delayed signal

$$S_{TxCal} = \quad (1)$$

$$A_1 \cdot A_3 \cdot A_5 \cdot e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{j\theta_1} \cdot e^{j\theta_3} \cdot e^{j\theta_5}$$

$$S_{RxCal} = \quad (2)$$

$$A_5 \cdot A_2 \cdot A_4 \cdot e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{j\theta_5} \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{j\theta_4}$$

$$S_{ShortCal} = \quad (3)$$

$$A_5 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{j\theta_5} \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{j\theta_3}$$

$$TX/RX \text{ main path} = \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{TxCal \cdot RxCal}{ShortCal} - \frac{(A_4 \cdot A_5 \cdot e^{j\theta_4} \cdot e^{j\theta_5})}{A_3 \cdot e^{j\theta_3}} \\ &= \frac{TxCal \cdot RxCal}{ShortCal} - \text{Residual term} \\ &= PG \text{ Product} \end{aligned}$$

$$LinearPhase = \frac{d(\theta_{PG} - \theta_{Ideal})}{df_{BW}} \quad (6)$$

$$\frac{TxCal \cdot RxCal}{ShortCal} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(A_1 \cdot A_3 \cdot A_5 \cdot e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{j\theta_1} \cdot e^{j\theta_3} \cdot e^{j\theta_5}) \cdot (A_5 \cdot A_2 \cdot A_4 \cdot e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{j\theta_5} \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{j\theta_4})}{A_5 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot e^{j\pi\mu t^2} \cdot e^{j\theta_5} \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{j\theta_3}} \\ &= (A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot e^{j\theta_1} \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{j\theta_3} \cdot e^{j\theta_4}) \cdot \frac{(A_4 \cdot A_5 \cdot e^{j\theta_4} \cdot e^{j\theta_5})}{A_3 \cdot e^{j\theta_3}} \\ &= (Tx/Rx \text{ main path}) \cdot \frac{(A_4 \cdot A_5 \cdot e^{j\theta_4} \cdot e^{j\theta_5})}{A_3 \cdot e^{j\theta_3}} \end{aligned}$$

IV. 시험 결과 분석

본장에서는 영상레이다 개발 간 지상시험을 통해 획득한 검보정 신호를 통해 본 논문에서 제시한 내부 지연 개선 기법에 대하여 검증 수행하였다. 그림 1과 같이 영상레이다를 구성하는 장치 전체가 통합된 형상으로 시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 모드 파라미터는 표 1과 같다. 영상레이다 검보정경로를 통해 획득한 신호는 그림 5와 같으며, 펄스폭에 대하여 신호 분주비(0.0ns) 만큼 샘플링(Sampling)을 수행하여 도시한 결과이다. 검보정경로 신호를 이용하여 PG product 수행에 따른 송수신경로의 특성함수는 그림 6과 같다. PG product 신호와 이상 신호와의 주파수에 따른 선형위상은 그림 7과 같다. 그림 7에서 실선은 PG product와 이상 신호와의 위상 차이를 나타내며, 점선은 RF 운용 주파수 대역에 따른 위상 변화량을 나타낸다. 해당 주파수 대역에 따른 선형 위상 변화량인 기울기가 최종 산출된 송수신경로의 내부 지연이 된다.

표 1. 지상시험 수행 위한 모드 파라미터
Table 1. Mode parameter for on-ground test

Mode parameter	
Pulse width	25.8us
Bandwidth	152MHz
PRF	5.8kHz
Acquisition time	7.5sec
Polarization	dual polarization
Samples	20

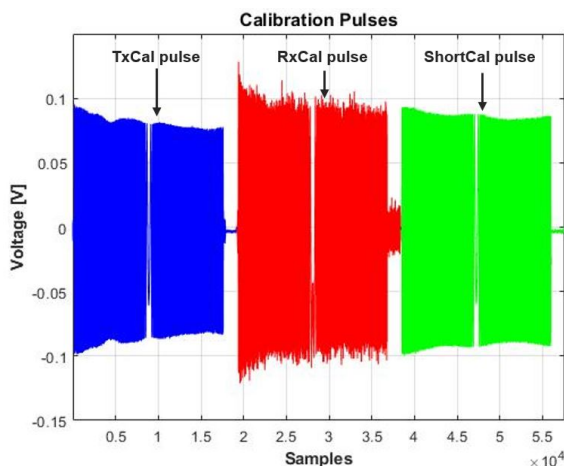


그림 5. 검보정경로 획득 신호
Fig. 5. Measured internal calibration data

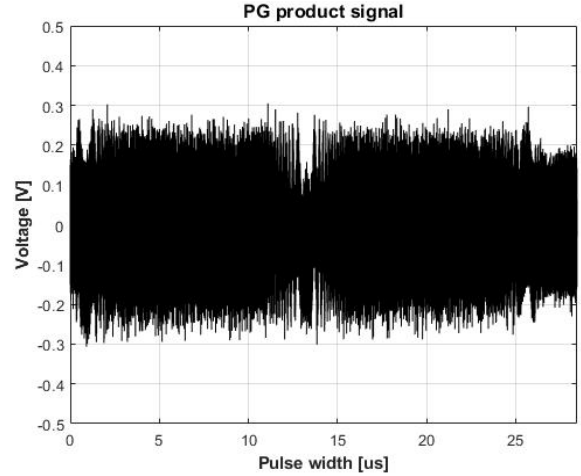


그림 6. 송수신경로 특성함수 신호
Fig. 6. PG product signal

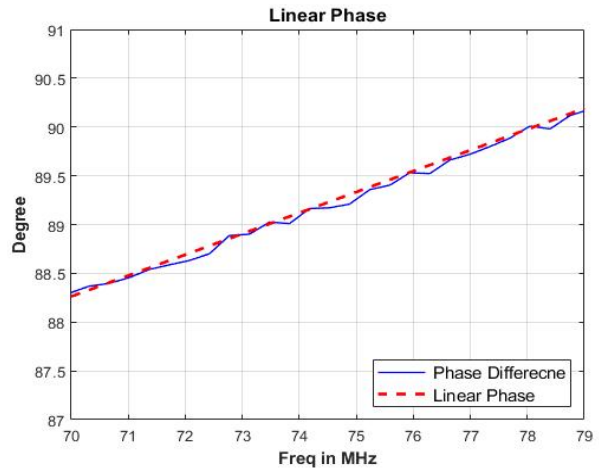


그림 7. 선형 위상 변화 결과
Fig. 7. Result of linear phase

검보정경로 신호를 통해 개선 기법을 기반으로 최종 산출된 내부 지연은 그림 8과 같다. 시험결과 분석을 위해 검보정경로에서 획득한 20개의 신호를 사용하여 내부 지연을 분석하였다. 송수신경로의 내부 지연은 평균 300.27ns 이며, 표준편차(정확도) 값은 5.62ps 이다.

내부 지연의 표준편차 값을 통해 각각의 장치들이 올바르게 타이밍 제어가 되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 지상시험 수행 시 기존의 내부 지연 측정 방법과 비교하였고 해당 결과는 표 2에 작성하였다. 기존 방법과 개선 기법의 차이는 1.14ns로 기존 측정 방법과 비교하여 큰 차이가 없음을 확인하였고, 개선된 기법으로 간단하게 내부 지연을 측정할 수 있음을 확인하였다.

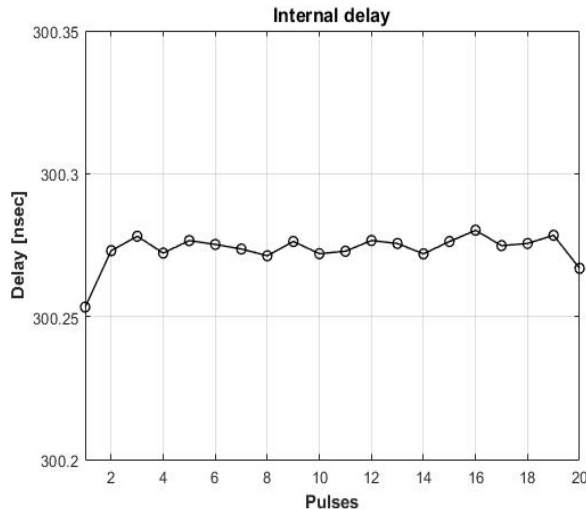


그림 8. 송수신경로 내부지연
Fig. 8. Internal delay of main signal path

표 2. 내부 지연 측정 방법에 따른 비교 결과
Table 2. Results of internal delay according to the measuring method

Comparison of internal delay	
Existing method	301.41ns
Improved methodology	300.27ns
Deviation(existing - improved)	1.14ns

V. 결 론

내부 지연은 모드 운용 시 표적의 위치 정확도에 영향을 주는 요소로서 내부 지연을 반영한 영상레이다 타이밍 운용은 필수적이다. 본 논문에서는 기존의 번거롭고, 시간이 많이 소요되는 내부 지연 측정 방법을 개선하기 위해 영상레이다 검보정경로를 통해 획득한 신호를 기반으로 송수신경로의 내부 지연을 개선하는 기법을 제시하였다. 지상시험 시 해당 기법을 통해 내부 지연을 산출하였고, 정확도 (5.62ps)를 통해 영상레이다를 구성하는 각 장치들이 정교하게 타이밍 제어가 되고 있고, 해당 규격을 만족함을 확인하였다.

또한 기존 측정 방법과 비교하여 1.14ns로 큰 차이가 없음을 확인하여, 본 논문에서 제시한 기법을 통해 내부 지연을 측정할 수 있음을 검증하였다.

References

- [1] J. C. Curlander, and R. N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing", JohnWiley & Sons, Inc., pp. 15-16, Nov. 1991.
- [2] M. Schwerdt et al., "Independent System Calibration of Sentinel-1B", Remote Sensing, Vol. 9, No. 6, pp. 511-544, May 2017.
- [3] D. Geudtner et al., "Sentinel-1A/B SAR and InSAR Performance", 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, pp. 641-645, Aug. 2018.
- [4] H. I. Lee, "A Novel Timing Control Method for Airborne SAR Motion Compensation", Journal of KIMST, Vol. 13, No. 3, pp. 453-460, Jun. 2010.
- [5] H. I. Lee, S. Y. Kim, B. T. Jeon, and J. B. Sung, "Operational Concept Design and Verification for Airborne SAR System", Journal of KSAS, Vol. 41, No. 7, pp. 588-595, Jul. 2013.
- [6] J. B. Sung, S. Y. Kim, H. I. Lee, and B. T. Jeon, "Modeling and Simulation Techniques for Performance Analysis of High Resolution SAR System", Journal of KIEES, Vol. 24, No. 5, pp. 558-565, May 2013, <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.5.558>.
- [7] J. B. Sung, S. Y. Kim, J. H. Lee, and B. T. Jeon, "Development and Performance Compensation of the Extremely Stable Transceiver System for High Resolution Wideband Active Phased Array Synthetic Aperture Radar", Journal of KIEES, Vol. 21, No. 6, pp. 573-582, Jun. 2010, <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2010.21.6.573>.
- [8] S. Y. Kim, J. B. Sung, and A. Torre, "In-Orbit Antenna Pattern Extraction Method for Active Phased-Array SAR Antennas", IEEE Ant. and Wireless Prop. Letters, Vol. 15, pp. 317-320, Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/LAWP.2015.2443129>.

저자소개

차 경 현 (Kyung-Hyun Cha)



2014년 8월 : 광운대학교
전파공학과(공학사)
2016년 8월 : 광운대학교
전파공학과(공학석사)
2016년 10월 ~ 현재 :
국방과학연구소 연구원
관심분야 : 영상레이다 시스템

이 종 환 (Jong-Hwan Lee)



1998년 2월 : 충남대학교
전파공학과(공학사)
2000년 2월 : 충남대학교
전파공학과(공학석사)
2005년 1월 ~ 2006년 10월 :
(주)삼성탈레스 책임연구원
2006년 2월 : 충남대학교

전파공학과(공학박사)

2006년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 영상레이다 시스템

김 세 영 (Se-Young Kim)



1991년 2월 : 단국대학교
전자전기공학부(공학사)
1993년 2월 : 단국대학교
전자전기공학과(공학석사)
2010년 2월 : 한국과학기술원 전기
및 전자공학과(공학박사)
1993년 3월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 레이더 및 영상레이다 시스템 등