

## 다 대역 영상레이다장비의 유령영상 위치

## Positions of Ghost Images on Multiband Synthetic Aperture Radar

이현철<sup>1</sup> · 이상규<sup>2</sup> · 유상범<sup>3</sup> · 허행팔<sup>4</sup>Hyeon-Cheol Lee<sup>1</sup> · Sang-Gyu Lee<sup>2</sup> · Sang-Burm Ryu<sup>3</sup> · Haeng-Pal Heo<sup>4</sup>

## 요 약

2개 이상의 서로 다른 대역(중심주파수가 다른)을 사용하는 deramped SAR 장비에서는, 경제성으로 인한 단일수신기 사용 시 각각 다른 PRF를 사용하면 타 대역의 영상이 나타나 유령영상이 된다. 본 논문에서는 역레이다영상 획득 시에 나타나는 유령영상의 정확한 위치를 알기 위해 수학적 수식을 사용하여 다 대역 시의 유령영상 위치를 계산하였고, 대역 폭, PRF가 같아도  $T_u$ (unprocessed time interval)가 다르면 실제영상의 인근에 유령영상이 나타남을 확인하였다. 유령영상은 시간지연이 있어도 시간지연이 없을 때와 동일한 위치에 나타나며,  $T_u$ 를 변경해서 유령영상의 영향을 최소화하여야 한다.

## Abstract

In deramped synthetic aperture radar (SAR) equipment that utilizes two or more different bands (different center frequencies), if different pulse repetition frequencies (PRFs) are employed when using a single receiver, owing to its economic feasibility, images of other bands may appear and become ghost images. In this study, to determine the exact location of a ghost image illustrated in inverse SAR images, mathematical formulas are adopted to determine the location of the ghost image in the multiband. Even if the bandwidth and PRF are the same, if  $T_u$  (unprocessed time interval) is different, we can observe that a ghost image appears near the actual image. If a time delay is noted, the ghost image appears at the same position as that in the absence of a delay. Thus, the effect of ghost images should be minimized by changing  $T_u$ .

Key words: Deramped, SAR, ISAR, FMCW, Ghost Image

## I. 서 론

위성에서 지구를 관측하는 수단으로 광학카메라, 적외선 카메라, 영상레이다(synthetic aperture radar, SAR)<sup>[1]</sup> 등이 알려져 있다. 광학카메라는 영상이 깨끗하고 명확하지만, 비, 구름 등 악기상에 취약하고, 주간에만 사용할 수

있다는 단점이 있다. 적외선 카메라는 밤에도 사용할 수는 있지만, 비, 구름 등 기상으로 인한 제한이 역시 존재하며, SAR는 비, 구름 등 기상과 무관하고, 야간에도 관측이 가능하다는 점에서 큰 강점이 있다.

한국항공우주연구원은 5.40 GHz, 9.66 GHz, 13.5 GHz의 C, X, Ku 다 대역 영상레이다<sup>[2]</sup>를 연구한 바 있으며,

「이 연구는 한국항공우주연구원 C-밴드 영상레이다 탑재체 기반기술 개발(RE201905009) 과제 및 차세대중형위성5호 탑재체 개발 과제의 연구비 지원으로 연구되었음.」

「이 연구는 환경부 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급서비스 연구사업(2019002650002)에 의해 수행되었음.」

한국항공우주연구원 위성탑재체연구부(Satellite Payload Research & Development Division, Korea Aerospace Research Institute)

1: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-0585-9717>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-3060-7156>),

3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-4520-6515>), 4: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0001-9139-4583>)

· Manuscript received June 28, 2022 ; Revised July 20, 2022 ; Accepted August 22, 2022. (ID No. 20220628-001S)

· Corresponding Author: Hyeon-Cheol Lee (e-mail: hlee@kari.re.kr)

본 논문에서는 FMCW를 사용하는 deramped SAR에서 타 대역의 펄스로 인해 역레이다영상<sup>[3]</sup>에 발생하는 유령영상의 위치를 수식적으로 계산하였다.

II 장에서는 단일주파수<sup>[4]</sup>에서 유령영상 위치를 판별하는 식<sup>[5]</sup>을 역레이다영상<sup>[3]</sup>에, III 장에서는 다중주파수에서 유령영상 위치를 판별하는 식 (5)를 역레이다영상<sup>[3]</sup>에 각각 적용하였다. IV 장에서는 다중주파수의 수신신호에 지연시간이 있을 경우에 역레이다영상의 유령영상 위치를 판별하는 식을 전개하고, V 장에서는 다 대역 사용 시 나타나는 유령영상의 위치를 계산하여 타 대역과의 간섭을 확인하였다.

## II. Mono-Band SAR

단일 입출력인 경우, 실제 송신신호  $S_{tx}(t)$ 는

$$S_{tx}(t) = \exp(j(2\pi f_c t + \pi\gamma t^2 + \phi)) \quad (1)$$

와 같으며<sup>[5]</sup>,  $f_c$ 는 center frequency,  $\gamma$ 는 chirp rate,  $\phi$ 는 initial phase를 나타내며,

$$\gamma = B/T, T = PRF^{-1} - T_u \quad (2)$$

로 표현가능하고,  $B$ 는 대역폭, PRF는 pulse repetition frequency,  $T$ 는 시간,  $T_u$ 는 이 동안 수신신호가 없는 unprocessed time interval을 나타낸다. 목표물이 SAR 장비로부터 거리  $R$ 에 있고 수신신호  $S_{rx}(t)$ 는

$$S_{rx}(t) = \sigma S_{tx}(t - 2R/C) \quad (3)$$

와 같다. 여기서  $C$ 는 빛의 속도,  $\sigma$ 는 수신신호의 크기이다. 정현파 형태로 표현되는 beat signal(거리에 비례하는 주파수신호)은

$$\begin{aligned} S_b(t) &= S_{tx}(t) S_{rx}^*(t) \\ &= \sigma \exp\left(j\left(\frac{4\pi\gamma R t}{C} + \frac{4\pi R f_c}{C} - \frac{4\pi\gamma R^2}{C^2}\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

처럼 표현할 수 있고, 이 beat signal에서 주파수,  $f_b$ 는

$$f_b = 2\gamma R/C \quad (5)$$

이고, 두 번째 항인  $(4\pi R f_c)/C$ 는 slow-time phase이며, 세 번째 항은 residual phase이므로 무시한다. 이 beat signal의

대역폭,  $B_b$ 는

$$B_b = 2\gamma R_{\max}/C \quad (6)$$

로 표현되며,  $R_{\max}$ 는 에코가 존재 가능한 최대 거리이다. 보통 송신 대역폭보다 매우 좁다.

## III. Multiband SAR

참고문헌 [5]에서는 다대역을 사용하는 deramped SAR 장비로 역레이다영상 추출 시 나타날 수 있는 유령영상의 위치계산식을 전개하였으며, 입출력이 multiple인 경우 아래의 수식으로 표현하였다.  $M$ 은 multiband란 표현이고  $N$ 은,  $N$ 개의 band를 나타낸다.

$$S_{tx,M}(t) = \sum_{i=1}^N \exp(j(2\pi f_{c,i} t + \pi\gamma_i t^2 + \phi_i)) \quad (7)$$

그 수신신호는

$$S_{rx,M}(t) = \sigma_i S_{tx,M}(t - 2R/C) \quad (8)$$

와 같으며, 이 multiband의  $i$ 번째 beat signal은

$$\begin{aligned} S_{bi,M}(t) &= \exp(j(2\pi f_{c,i} t + \pi\gamma_i t^2 + \phi_i)) S_{rx,M}^*(t) \\ &= \sigma_i \exp\left(j\left(\frac{4\pi\gamma_i R t}{C} + \frac{4\pi R f_{c,i}}{C} - \frac{4\pi\gamma_i R^2}{C^2}\right)\right) \\ &+ \sum_{l=1, l \neq i}^N \gamma_l \exp(j(2\pi(f_{c,i} - f_{c,l})t + \theta_l)) \end{aligned} \quad (9)$$

로 표현되며, 여기서

$$\begin{aligned} \theta_l &= 4\pi f_{c,l} R/C + \pi\gamma_l t^2 \\ &- \pi\gamma_l (t - 2R/C)^2 + (\phi_i - \phi_l) \end{aligned} \quad (10)$$

와 같고,  $\sigma_i$ 는  $i$ 번째 밴드의 수신신호의 크기를 나타낸다.

수신신호 역시 송신신호에서  $t$  대신  $(t - 2R/C)$ 로 대체하였고, 식 (9)의 첫 번째 식의 세 번째 항은 mono-band SAR와 동일하게 residual phase는 무시 가능하다. 그림 1에서와 같이 경제성으로 인해 단일수신기 적용 시, 수신단의 deramping 이후 표적거리에 따라 유사한 대역으로 하향변환하기 때문에 유령영상의 별도 필터링은 어렵다. 그리고 실제영상은 항상 동일 위치가 아니므로, 유령영상도 매번

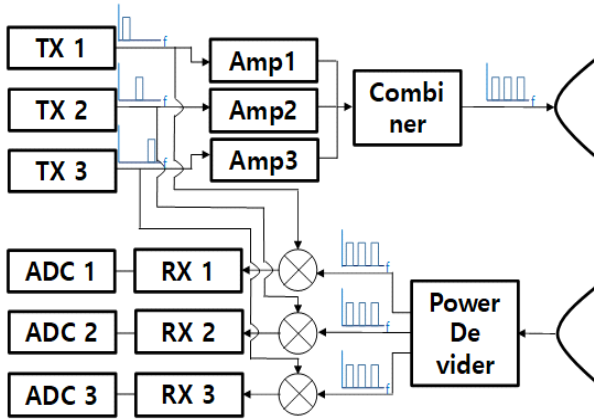


그림 1. N개 deramped SAR 구조(FMCW 사용)  
Fig. 1. N-piece deramped SAR structure (FMCW used).

다른 위치에, 그리고 실제영상 인근에 나타난다.

$i$ 번째 주파수별 beat signal의 주파수는 다음과 같다.

$$f_{b,i} = 2\gamma_i R / C \quad (11)$$

결과적으로 다 대역의  $i$  번째 beat signal은 아래와 같다.

$$S_{bi,M}(t) = \sigma_i \exp \left( j \left( \frac{4\pi\gamma_i R t}{C} + \frac{4\pi R f_{c,i}}{C} \right) \right) \quad (12)$$

#### IV. Multiband SAR with a Delay

본 논문에서는 수신신호에  $d1$ 의 시간지연이 있을 경우의 수식전개를 시도하였다. 수신신호는 앞의 식과 다르게

$$S_{rx,M}(t) = \sigma_i S_{tx,M}(t - 2R/C - d1) \quad (13)$$

와 같으며, 그 beat signal은

$$S_{bi,M}(t) = \sigma_i \exp \left( j \left( \frac{4\pi\gamma_i R t}{C} + \frac{4\pi R f_{c,i}}{C} - \frac{4\pi\gamma_i R^2}{C^2} \left( \frac{C}{R} d1 + 1 \right) \right) \right) + \sum_{l=1, l \neq i}^N \gamma_l \exp \left( j \left( 2\pi(f_{c,i} - f_{c,l})t + \theta_l \right) \right) \quad (14)$$

이다. 여기서  $\theta_l$ 은 아래와 같다.

$$\theta_l = 4\pi f_{c,l} R / C + 2\pi f_{c,l} (d1) + \pi\gamma_i t^2 - \pi\gamma_l (t - 2R/C - d1)^2 + (\phi_i - \phi_l) \quad (15)$$

Mono-band와 동일하게 식 (14)의 첫 번째 식의 세 번째 항도 residual phase라 무시 가능하고, 두 번째 식도 고주파수라 제거 가능하다. 한편,  $d1$ 이 있어도 실제로  $d1$ 이 없는 수식해석과 동일한 결과가 나타나게 되므로, 시간지연이 있는 다 대역의 최종 식은 식 (12)와 동일하고 유령영상 위치는 시간지연과 상관없이 동일하게 된다.

#### V. Interferences on Multiband

X 대역의 대역폭, 150 MHz, C, Ku 대역 대역폭 50 MHz에 맞추어 유령영상의 위치를 식 (16)으로 계산하면, 타 대역 중심주파수 때문에 유령영상이 나타남을 알 수 있다.

$$R_i = f_{b,j \neq i} C / (2\gamma_i) \quad (16)$$

표 1은 PRF와  $T_u$ 가 모두 다르고, 표 2와 표 3은 2개의 PRF, 2개의  $T_u$ 가 같다. 다만 표 2는 5.40 GHz와 13.5 GHz의  $T_u$ 가 같으나, 표 3은 9.66 GHz와 13.5 GHz의  $T_u$ 가 동일하다.

표 2의 5.40 GHz와 13.5 GHz의 유령영상 위치( $R_i$ )를 비교하면 중심주파수가 달라도  $B$ ,  $PRF$ ,  $T_u$ 가 동일하면 실제 영상과 동일한 위치(300 m, 300 m)에 보이게 된다. 그러나, 표 3에서 보듯이  $T_u$ 가 조금만 달라도 인근(289.31 m,

표 1. 주파수별 유령영상 위치 1(실제영상위치: 300 m)

Table 1. Ghost image positions 1 by frequencies (actual image position: 300 m).

$f_c$	5.40 GHz	9.66 GHz	13.5 GHz
$B$	50 MHz	150 MHz	50 MHz
$PRF$	1,000 Hz	1,500 Hz	2,000 Hz
$T_u$	100 us	66.7 us	50 us
$\gamma_i$	5.555e10 Hz/s	2.5e11 Hz/s	1.111e11 Hz/s
$f_{b,i}$	111.1 kHz	500 kHz	222.2 kHz
$R_i$ of ghost images	1,350.14 m (generated from 9.66 GHz)	66.66 m (generated from 5.40 GHz)	150 m (generated from 5.40 GHz)
	600 m (generated from 13.5 GHz)	133.32 m (generated from 13.5 GHz)	675.07 m (generated from 9.66 GHz)

표 2. 주파수별 유령영상 위치 2(실제영상위치: 300 m)  
Table 2. Ghost image positions 2 by frequencies (actual image position: 300 m).

$f_c$	5.40 GHz	9.66 GHz	13.5 GHz
$B$	50 MHz	150 MHz	50 MHz
$PRF$	1,000 Hz	1,500 Hz	1,000 Hz
$T_u$	100 us	66.7 us	100 us
$\gamma_i$	5.555e10 Hz/s	2.5e11 Hz/s	5.555e10 Hz/s
$f_{b,i}$	111.1 kHz	500 kHz	111.1 kHz
$R_i$ of ghost images	1,350.14 m (generated from 9.66 GHz)	66.66 m (generated from 5.40 GHz)	300 m (generated from 5.40 GHz)
	300 m (generated from 13.5 GHz)	66.66 m (generated from 13.5 GHz)	1,350.14 m (generated from 9.66 GHz)

표 3. 주파수별 유령영상 위치 3(실제영상위치: 300 m)  
Table 3. Ghost image positions 3 by frequencies (actual image position: 300 m).

$f_c$	5.40 GHz	9.66 GHz	13.5 GHz
$B$	50 MHz	150 MHz	50 MHz
$PRF$	1,000 Hz	1,500 Hz	1,000 Hz
$T_u$	100 us	66.7 us	66.7 us
$\gamma_i$	5.555e10 Hz/s	2.5e11 Hz/s	5.357e10 Hz/s
$f_{b,i}$	111.1 kHz	500 kHz	107.14 kHz
$R_i$ of ghost images	1,350.14 m (generated from 9.66 GHz)	66.66 m (generated from 5.40 GHz)	311.09 m (generated from 5.40 GHz)
	289.31 m (generated from 13.5 GHz)	64.28 m (generated from 13.5 GHz)	1,400.04 m (generated from 9.66 GHz)

311.09 m)에 유령영상이 존재하여 영상이 겹쳐 보이면서 선명치 않게 됨을 알 수 있다. 물체위치에 따라 실제영상과 유령영상도 매번 다른 위치에 나타나므로 대역통과필

터로 사전 필터링에도 어려움이 예상된다.

## VI. 결 론

다 대역 영상레이다에 있어서, 경제성으로 인해 단일 수신기를 적용하고 유령영상의 별도 필터링이 곤란한 경우 유령영상이 발생하게 된다. 이러한 유령영상의 위치를 파악하기 위해 수식으로 위치를 계산하고, 중심주파수가 달라도 다 대역의 영향에 의해 유령영상이 나타남을 확인하였다. 계산 결과, 시간지연이 있을 경우도 시간지연의 정도와 상관없이 유령영상의 위치는 동일하게 나타남을 알 수 있었으며,  $T_u$ 를 변경해서 유령영상의 영향을 조정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

## References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [2] J. W. Lim, J. W. Lee, T. K. Lee, H. C. Lee, S. G. Lee, and S. B. Ryu, et al., "Performance evaluation of a modified sweepSAR mode for quad-pol application in SAR systems," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 3, pp. 199-205, Jul. 2020.
- [3] C. C. Chen, H. C. Andrews, "Target-motion-induced radar imaging," *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 2-14, Jan. 1980.
- [4] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2002.
- [5] J. M. Muñoz-Ferreras, R. Gómez-García, "A deramping-based multiband radar sensor concept with enhanced ISAR capabilities," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 9, pp. 3361-3368, Sep. 2013.