

바이스태틱 FMCW 레이더 비동기 현상의 신호 모델링 및 ISAR 영상 내 영향 분석

Signal Modeling for Bistatic FMCW Radar Asynchronization and Its Effect on ISAR Images

이경민 · 이인성* · 신희섭** · 옥재우** · 윤재혁** · 유응노** · 양종렬*** · 김경태

Kyung-Min Lee · In-Seong Lee* · Hee-Sub Shin** · Jae-Woo Ok** · Jae-Hyuk Youn** ·
Eung-Noh You** · Jong-Ryul Yang*** · Kyung-Tae Kim

요 약

바이스태틱(bistatic) 주파수 변조 연속파(frequency modulated continuous wave, FMCW) 영상 레이더 시스템은 송·수신기의 공간상 분리로 인해 서로 다른 국부 발진기(local oscillator, LO)와 클럭 신호를 사용하며, 이로 인해 다양한 요인의 비동기(asynchronization) 현상이 발생하여 레이더 영상의 품질을 악화시킨다. 이에 본 논문에서는 다양한 바이스태틱 FMCW 레이더의 비동기 현상을 1) 참조 신호 간 시간 차, 2) LO 위상 잡음 차, 3) 송·수신기의 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency) 불일치 및 4) 참조 신호 간 중심 주파수 차 네 가지 요인으로 나누어 각 요인이 FMCW 레이더 시스템에 발생할 시의 신호 모델을 정의하였으며, 각 요인별 역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar, ISAR) 영상을 형성하여 ISAR 영상 품질 지표 분석을 통한 비동기 현상의 영향력을 분석하였다.

Abstract

A static frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radar imaging system uses different local oscillator (LO) and clock signals owing to the spatial separation of the transmitter and receiver, resulting in asynchronization problems of various factors that can deteriorate the quality of radar images. In this study, we defined signal models for bistatic FMCW asynchronization factors: 1) the time difference between reference signals in the transmitter and receiver, 2) LO phase noise difference, 3) pulse repetition frequency mismatch, and 4) center frequency difference. We generated ISAR images of the point scatterer for each asynchronization factor to analyze the influence of asynchronization through the ISAR image in terms of quality parameters.

Key words: Bistatic Radar, Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW), Asynchronization, Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)

「이 연구는 LIG넥스원 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*영남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

**LIG넥스원(LIG Nex1 Co., Ltd)

***건국대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronics Engineering, Konkuk University)

· Manuscript received February 10, 2023 ; Revised February 21, 2023 ; Accepted February 23, 2023. (ID No. 20230210-013)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

I. 서 론

주파수 변조 연속파(frequency modulated continuous wave, FMCW) 레이더는 주파수가 선형적으로 증가 혹은 감소하는 연속 신호를 표적 및 지형으로 송신, 반사된 신호를 수신하여 디램핑(deramping) 과정을 통해 표적 및 지형의 거리 및 속도 정보를 취득하는 레이더 기술이다^[1]. FMCW 레이더는 전체 송, 수신 과정이 기존 펄스 기반 레이더 시스템 대비 단순하게 구성할 수 있으며, 동일한 성능을 내기 위해 요구되는 하드웨어의 복잡도가 낮으며, 레이더 시스템의 하중을 낮출 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징을 활용하여 최근 무인기(unmanned aerial vehicle) 탑재 합성 개구면 레이더(synthetic aperture radar, SAR) 연구에 활용되고 있다^{[2]~[6]}.

또한 바이스테틱(bistatic) 구조의 FMCW 레이더 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[7]~[9]}. 바이스테틱 레이더는 송신기와 수신기가 서로 공간적으로 분리되어 레이더 신호를 송, 수신하는 레이더로, 송·수신기가 서로 다른 공간에 배치되기 때문에 기존 모노스테틱(monostatic) 대비 공간 활용도가 높으며, 관측 표적에 대한 다양한 레이더 반사 정보를 얻을 수 있는 장점들이 있다. 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템을 활용한 바이스테틱 SAR를 구축할 경우, 관측 표적 및 지형에 대한 다양한 레이더 영상 정보를 보다 다양한 송·수신기 배치에서 낮은 시스템 복잡도를 가지는 하드웨어로부터 얻을 수 있다.

그러나, 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템의 송신기와 수신기는 서로 다른 공간에 배치되기 때문에 서로 다른 국부 발진기(local oscillator, LO)로 인한 비동기(asynchronization) 현상이 발생하는 문제점이 있다^{[10][11]}. 바이스테틱 FMCW 레이더는 송신기와 수신기가 서로 다른 공간에 배치되기 때문에 일반적으로 다른 LO로부터 참조 신호(reference signal)를 받으며, 두 LO로부터 발생한 참조 신호 간의 차이로 인해, 수신된 신호가 정상적으로 디램핑이 되지 못한다^{[10][11]}. 이러한 FMCW 레이더 시스템의 비동기 현상은 관측 표적 및 지형에 대한 정확한 거리 측면도(range profile)를 형성하지 못하게 하며, 정확한 레이더 정보 활용을 불가능하게 만든다^{[10][11]}. 따라서 바이스

테틱 FMCW 레이더 시스템 구축을 위해선 동기화(synchronization) 과정을 통한 송·수신기 간의 비동기 현상에 대한 해결이 반드시 요구된다.

바이스테틱 FMCW 레이더 시스템 내 송·수신기의 두 참조 신호 간 차이는 FMCW 시스템 내부의 다양한 비동기 요인으로부터 발생되기 때문에, 바이스테틱 FMCW 레이더의 동기화 연구를 위해선 비동기 현상에 대한 정밀한 신호 모델링 관점의 분석이 요구된다. 그러나 현재 바이스테틱 FMCW 레이더의 비동기 요인에 대한 신호 모델링 분석 연구가 전반적으로 미비한 상황이다.

이에 본 논문에서는 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템에서 발생하는 비동기 현상들에 대한 신호 모델링 관점의 분석을 제안한다. 먼저 바이스테틱 FMCW 레이더에서 발생할 수 있는 비동기 오차 요인들을 신호 모델링을 통해 제안하고, 각 요인들이 FMCW 레이더 시스템에 가하는 영향력을 영상 신호처리 과정으로 형성된 레이더 영상을 분석하여 확인하였다. 본 연구의 비동기 현상 분석을 위해 SAR와 신호처리 과정이 유사한 역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar, ISAR) 영상을 시뮬레이션 환경에서 형성하였으며^[12], 각 비동기 요인에 대한 ISAR 영상의 변화를 레이더 영상 성능 지표들 및 영상 엔트로피(entropy) 관점으로 분석하였다.

본 논문의 진행 순서는 다음과 같다. II장에서는 이상적인 바이스테틱 FMCW 레이더의 수신 신호 취득 과정에 대해 설명한다. III장에서는 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템에서 발생할 수 있는 비동기 요인들별 신호 모델을 기술한다. IV장에서는 각 바이스테틱 비동기 요인들이 반영된 시뮬레이션 환경의 ISAR 영상 형성 결과를 도출 및 영상 품질을 분석한다. V장에서는 결론 및 향후 연구에 대해 기술한다.

II. 이상적인 바이스테틱 FMCW 레이더의 수신 신호 취득

FMCW 레이더의 송신기는 일반적으로 선형적으로 주파수 변조된 연속 신호를 위상 동기 회로(phase-locked loop, PLL)를 가진 LO의 참조 신호로 받으며, 생성된 송신 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \text{rect}(t/T) e^{j2\pi \left(f_c t + \frac{K_r}{2} t^2 \right)} \quad (1)$$

여기서 T 는 참조 신호의 시간 폭을, f_c 는 중심 주파수를, K_r 은 처프 율(chirp rate)을 의미하며, 본 연구에서는 선형 증가 FMCW 신호를 가정한다. 상기 신호를 송신기에서 관측 표적 및 지형으로 송신하여 반사 신호를 수신기에서 수신한다. 송신기-표적-수신기로 FMCW 신호가 이동한 후 수신기에 도달할 시, 기존 송신 신호 대비 시간 지연이 발생하며, 이는 식 (2)와 같다^[7].

$$s_r(t) = a(t - \tau_d) e^{j2\pi \left(f_c(t - \tau_d) + \frac{K_r}{2}(t - \tau_d)^2 \right)} \\ = a(t - \tau_d) e^{j2\pi f_c t} e^{-j2\pi f_c \tau_d} e^{j\pi K_r t^2} e^{-j2\pi K_r \tau_d t} e^{j\pi K_r \tau_d^2} \quad (2)$$

여기서 $a(t)$ 는 레이더 방정식을 거쳐 진폭이 결정된 FMCW 수신 신호의 윈도우 함수를, τ_d 는 송신 FMCW 신호가 송신기-표적-수신기를 이동한 시간을 의미하며, 이는 식 (3)과 같다.

$$\tau_d = (r_t + r_r)/c \quad (3)$$

이때 r_t 와 r_r 은 각 송·수신기와 관측 표적 간 거리를, c 는 빛의 속력을 의미한다. 식 (2) 내 $e^{j2\pi f_c t}$ 는 수신기에서 디램핑 내 복조(demodulation) 과정으로 소거되며, $e^{j\pi K_r \tau_d^2}$ 는 잔존 비디오 위상(residual video phase)으로, 신호처리 과정에서 영향이 미미하기 때문에 생략, 혹은 보상 신호 처리로 소거가 가능하다^[13]. 세 번째 선형 주파수 증가 항은 수신기의 디램핑 과정으로 소거될 수 있으며, 상기 과정을 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$s_d(t) = \overline{s_r}(t) \cdot s(t) = a'(t - \tau_d) e^{j2\pi f_c \tau_d} e^{j2\pi K_r \tau_d t} \quad (4)$$

여기서 $\overline{s_r}(t)$ 는 수신 신호의 켤레 복소수화를 의미하며, $a'(t)$ 는 디램핑된 신호의 윈도우 함수로 수신 신호의 시간 지연으로 인해 디램핑 과정에서 로우 패스 필터(low-pass filter)로 일부 고주파 신호 성분이 제거됨에 따라 신호 폭이 $a(t)$ 보다 줄어든다^[1]. $e^{j2\pi f_c \tau_d}$ 는 도플러 항으로, SAR 및 ISAR 영상 신호처리 과정에서 연속적인 거리 측면도를 쌓음으로써 방위 방향의 거리 측면도를 형성하는 데 사용되며^{[13]~[15]}, $e^{j2\pi K_r \tau_d t}$ 는 비트 주파수(beat frequency)를 가진 위상 항으로, 푸리에 변환(Fourier transform)

과정으로 1차원의 거리 측면도를 형성한다.

송·수신된 FMCW 신호의 거리 방향의 거리 측면도를 푸리에 변환으로 표현한 결과는 식 (5)와 같다.

$$S(r) = S(cf/K_r) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt = A'(f) * \delta(r - r_{bi}) \quad (5)$$

여기서 r_{bi} 는 바이스태틱 왕복 거리로 $r_{bi} = r_t + r_r$ 이며, $A'(f)$ 는 $a'(t)$ 의 푸리에 변환 결과로, 거리 측면도의 점 확산 함수(point spread function, PSF)가 된다.

그림 1은 상기 FMCW 신호의 전체 신호 취득 과정을 도시하고 있으며, 그림 2는 시간-주파수 영역에서 수신된 신호와 수신기의 참조 신호 간의 관계를 보여주고 있다. 이상적인 바이스태틱 FMCW 레이더 시스템 환경에서는 그림 1과 같이 송·수신기의 LO에서 동일한 참조 신호, $s(t)$ 를 사용하므로 정확한 거리 측면도 정보를 연속적으로 얻을 수 있으며, 그림 2와 같이 각 수신 신호와 참조

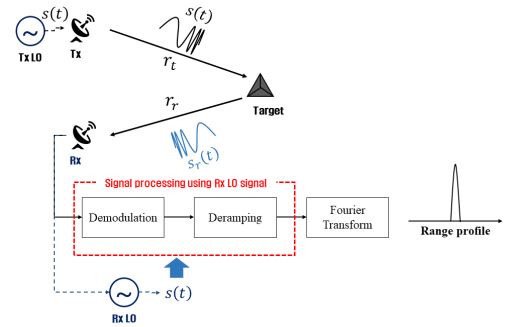


그림 1. 바이스태틱 FMCW 레이더 시스템의 이상적 신호 취득 과정

Fig. 1. Ideal signal acquisition process for bistatic FMCW radar system.

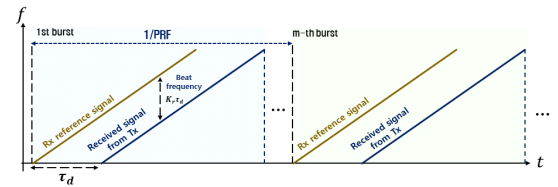


그림 2. 시간-주파수 영역에서의 수신 신호와 수신기의 참조 신호 간 관계

Fig. 2. Relationship between received signal and reference signal of receiver in tim-frequency domain.

신호 간의 주파수 차이를 비트 주파수로 두어, 디램핑 및 푸리에 변환을 통해 거리 성분을 추출할 수 있다. 상기 과정을 매 버스트(burst)마다 수행함으로써 연속적인 표적의 거리 측면도 변화 데이터를 얻을 수 있으며, 버스트 방향으로 방위 방향 신호처리를 함으로써 관측 표적의 SAR, ISAR 영상을 얻을 수 있다^{[13]~[15]}.

III. 바이스태틱 FMCW 레이다 비동기 요인 신호 모델링

바이스태틱 레이다의 송·수신기 LO는 공간상의 분리로 인하여, 일반적으로 같은 PLL 및 클럭 신호(clock signal)를 사용하지 못하기 때문에, 서로 다른 참조 신호를 가지게 되며, 이로 인해 디램핑 과정이 정상적 취득 과정과 달라진다. 본 장에서는 두 참조 신호 간 차이로 인한 비동기 요인을 네 가지 항목으로 나누어 신호 모델링을 수행하였다.

3-1 참조 신호 간 발생 시간 차로 인한 비동기 현상

바이스태틱 구조의 FMCW 환경에서 각 송·수신기의 LO는 서로 다른 클럭 신호를 받아 참조 신호를 발생시키며, 두 클럭 신호 간 시간 차 발생 시, 송·수신기의 참조 신호의 발현 시간에 차이가 나타나게 된다. 송·수신기 간의 발생 시간 차를 $\Delta\tau_t$ 라 할 때, 참조 신호 간 발생 시간 차로 비동기 현상이 일어난 신호 모델은 식 (6)과 같다.

$$s_{dcl}(t) = a'_{cl}(t - \tau_d) e^{j2\pi f_c(\tau_d - \Delta\tau_t)} e^{j2\pi K_r(\tau_d - \Delta\tau_t)t} \quad (6)$$

여기서 $a'_{cl}(t - \tau_d)$ 는 참조 신호의 지연으로 인해 시간 폭이 변형된 윈도우 함수이며, 저주파 대역 통과 필터(low-pass filter, LPF)에 의해 디램핑이 정확히 수행되지 않은 잔여 고주파 신호가 상쇄되어 결정된다^[1]. 식 (6)에서 $\Delta\tau_t$ 의 시간 차가 디램핑된 신호의 비트 주파수 천이를 유발하는 것을 볼 수 있으며, 도플러 주파수 항의 시간 지연 성분에도 영향을 주는 것이 확인된다. 그림 3은 시간 차로 인해 발생한 비트 주파수의 변화를 보여주고 있다. 이상적인 수신기 참조 신호의 경우, $K_r\tau_d$ 만큼의 비트 주파수 차이를 가지는 것에 반해, $\Delta\tau_t$ 만큼의 시간 차가

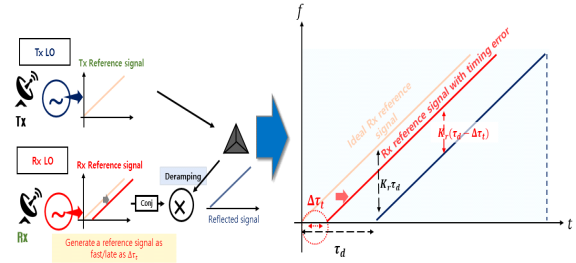


그림 3. 참조 신호 간 발생 시간 차 비동기 현상

Fig. 3. Timing asynchronization error between two reference signals.

발생한 참조 신호의 경우, $K_r(\tau_d - \Delta\tau_t)$ 로 비트 주파수가 변화하며, 형성된 거리 측면도에 거리 정보 오차를 유발한다.

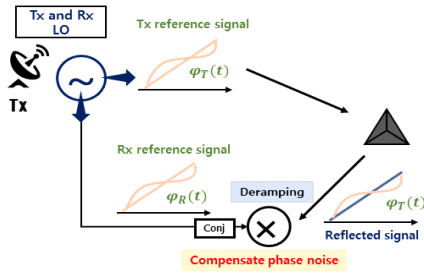
상기 $\Delta\tau_t$ 는 하드웨어의 시스템 구성에 따라 다양한 요인들로 정해지는 변수이기 때문에 일정한 상수의 정적(static) 형태와 무작위(dynamic) 형태로 표현이 가능하며, 이는 식 (7)과 같다.

$$\Delta\tau_t = \Delta\tau_{t,static} + \Delta\tau_{t,dynamic} \quad (7)$$

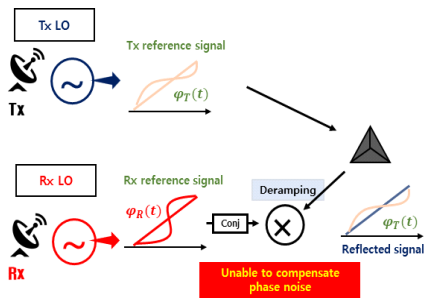
3-2 LO 위상 잡음 차로 인한 비동기 현상

LO에서 발생된 참조 신호는 다양한 잡음 요인들로 인해 원치 않는 위상 잡음이 추가된다^[10]. 해당 위상 잡음은 FMCW 신호의 선형성을 약화시키며, 선형성이 약화된 FMCW 참조 신호가 디램핑에 사용됨에 따라 형성된 거리 측면도 신호의 PSF를 왜곡시키는 문제를 야기한다.

일반적으로 기존 모노스테틱 FMCW 레이다는 상기 위상 잡음 오차에 대해 상대적으로 강인하다^{[10],[11]}. 그림 4(a)는 모노스테틱 환경에서의 참조 신호의 위상 잡음을 보여주고 있으며, 송신기와 수신기가 동일한 LO로부터 참조 신호를 받기 때문에 송신 신호에 존재하는 송신기 LO의 위상 오차인 $\varphi_T(t)$ 와 수신기의 디램핑에 사용되는 참조 신호의 위상 오차인 $\varphi_R(t)$ 가 서로 동일한 파형을 가지며, 디램핑 과정에서 상쇄가 가능하다^{[10],[11]}. 그러나 그림 4(b)와 같이, 바이스태틱 FMCW 레이다 시스템은 서로 다른 LO 신호를 가지기 때문에 디램핑 과정에서 $\varphi_T(t)$ 와 $\varphi_R(t)$ 간의 차이가 발생하게 되며, 이는 거리 측면도 형성에 악영향을 준다^{[10],[11]}.



(a) 모노스테틱 FMCW 레이다
(a) Monostatic FMCW radar case



(b) 바이스테틱 FMCW 레이다
(b) Bistatic FMCW radar case

그림 4. 참조 신호 간 위상 잡음 오차로 인한 비동기 현상

Fig. 4. Asynchronization owing to phase noise difference between two reference signals.

FMCW LO의 위상 잡음, $\varphi_T(t)$ 와 $\varphi_R(t)$ 는 특정 형태의 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD) 모델로 추정 가능하며, 이는 LO의 일반적인 위상 잡음 형태에서 추가적인 PLL 위상 오차가 고려된 잡음 층으로 표현된다^[16]. FMCW의 LO에서 발생하는 추가 위상 잡음 PSD는 식 (8)과 같다^[16].

$$PSD_{osc} = \frac{2L_p}{1 + \left(\frac{|f|}{0.5W_p}\right)^k} \quad (8)$$

여기서 L_p 는 레이다 신호 주엽(mainlobe) 최댓값과 잡음 층과의 차이를, W_p 는 잡음 층의 너비를 의미하며, 그림 5와 같은 형태를 가지며, k 는 롤-오프(roll-off) 차수를 의미한다($2 \leq k \leq 4$). $\varphi_T(t)$ 및 $\varphi_R(t)$ 는 상기 PSD 모델의 잡음층에 의해 무작위 신호로 발생된다.

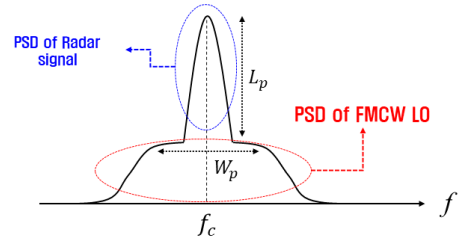


그림 5. FMCW LO의 위상 잡음 PSD
Fig. 5. PSD of phase noise from FMCW LO.

상기 바이스테틱 FMCW 위상 오차를 신호 모델로 표현하면 식 (9)와 같다^{[10],[11]}.

$$s_{de2}(t) = a'(t - \tau_d) e^{j2\pi f_c \tau_d} e^{j2\pi K_r \tau_d t} e^{j(\varphi_T(t - \tau_d) - \varphi_R(t))} \quad (9)$$

잔여 위상 잡음은 무작위의 비결정 신호이며, FMCW 신호의 선형성을 약화시킴으로써 FMCW 레이다 신호의 거리 측면도상의 PSF를 왜곡시키는 요인이 된다.

3-3 송·수신기 간 PRF 불일치로 인한 비동기 현상

SAR, ISAR는 표적 및 지형에 대해 연속적인 레이다 신호를 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency, PRF)의 역수인 펄스 반복 주기(pulse repetition interval, PRI)마다 송, 수신하며, 전체 레이다 시스템의 클럭 신호와 연계되어 PRI 마다 송·수신기가 동작한다. 일반적인 모노스테틱 FMCW 레이다는 클럭의 송, 수신이 동일한 시스템 및 LO에서 동작되기 때문에, 송·수신기 간의 PRF 차이가 미미하다. 그러나, 바이스테틱 구조의 경우, 서로 다른 LO 및 클럭 신호 사용으로 인하여 PRF 간 불일치가 발생할 수 있으며, 이는 송·수신기 참조 신호 간의 연속적인

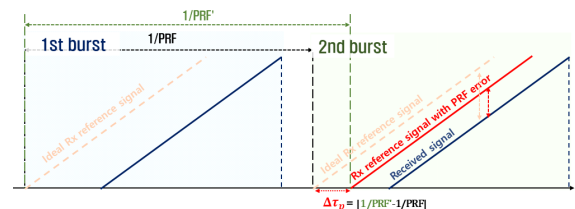


그림 6. 송, 수신기 간 PRF 차이로 인한 비동기 현상
Fig. 6. Asynchronization owing to PRF difference between transmitter and receiver.

시간 차를 유발하게 된다. 그림 6은 송·수신기 간 PRF 불일치에 의한 비동기 현상을 보여준다. 송·수신기 간의 PRF 차이는 매 버스트가 진행될수록 누적되어 시간 오차를 발생시킨다.

상기 송·수신기의 PRF 차이에 의한 PRI 차이를 $\Delta\tau_p$ 라 할 때, PRF 비동기 오차가 반영된 신호 모델은 식 (10)과 같다.

$$s_{de3}(t) = a'_{e3}(t - \tau_d) e^{j2\pi f_c(\tau_d - \Delta\tau_p)} e^{j2\pi K_r(\tau_d - \Delta\tau_p)t} \quad (10)$$

여기서 $a'_{e3}(t - \tau_d)$ 는 $\Delta\tau_p$ 의 영향으로 LPF에 의해 시간 폭이 변형된 윈도우 함수이다. 식 (10)은 식 (6)과 유사한 형태를 띄며, 동일한 거리 정보 오차 문제 및 도플러 대역 손상 문제를 유발한다.

$\Delta\tau_p$ 또한 이전과 마찬가지로 정적 오차 항과 동적 오차 항으로 표현할 수 있으며, 이는 식 (11)과 같다.

$$\Delta\tau_p = \Delta\tau_{p,static} + \Delta\tau_{p,dynamic} \quad (11)$$

여기서 $\Delta\tau_{p,dynamic}$ 은 매 버스트마다의 무작위 PRF 오차를 의미하며, 기존 $\Delta\tau_{t,dynamic}$ 과 유사한 형태를 가진다. 그러나 $\Delta\tau_{p,static}$ 은 매 버스트마다 동일하게 발생하는 오차를 의미하며, 버스트가 진행될수록 누적되어 거리 이동(range walk) 현상을 유발한다^[10]. 따라서 i 번째 버스트의 $\Delta\tau_{p,static}$ 은 다음과 같이 PRF 정적 오차 합산으로 표현된다.

$$\Delta\tau_{p,static,i} = \sum_{i=1}^M \Delta\tau_{p,static} \quad (12)$$

상기 현상은 SAR, ISAR 영상형성 신호처리 과정에 악영향을 끼쳐 온전한 영상형성을 방해할 수 있으므로 레이더 영상 형성을 위해 반드시 고려되어야 한다.

3.4 참조 신호 간 중심 주파수 차로 인한 비동기 현상

FMCW 레이더 시스템은 송신 신호와 동일한 중심 주파수를 가진 참조 신호를 디램핑 과정에서 복조를 수행한다. 그러나 서로 다른 LO를 가지는 바이스태틱 구조의 송·수신기는 디램핑 과정에서 서로 다른 중심 주파수를 가질 수 있으며, 중심 주파수 차이로 인한 비동기 오차가 발생하게 된다. 상기 현상이 발생한 수신 신호를 모델링하면 식 (13)과 같다.

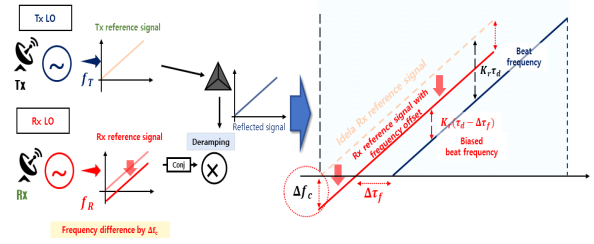


그림 7. 송, 수신기 간 중심 주파수 차이로 인한 비동기 현상

Fig. 7. Asynchronization owing to center frequency difference between transmitter and receiver.

$$s_{de4}(t) = a'_{e4}(t - \tau_d) e^{j2\pi(f_c - \Delta f_c)\tau_d} e^{j2\pi K_r(\tau_d - \Delta\tau_f)t} \quad (13)$$

여기서 Δf_c 는 비동기 현상으로 발생한 참조 신호 간의 중심 주파수 차이, $\Delta\tau_f$ 는 중심 주파수 차이로 인해 발생한 시간 지연이며 이는 식 (14)와 같다.

$$\Delta\tau_f = \Delta f_c / K_r \quad (14)$$

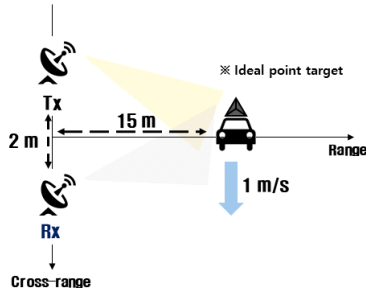
따라서 중심 주파수 차이는 비트 주파수를 변화시킴에 따라 수신 신호의 거리 정보에 오차를 유발한다. 그림 7은 상기 중심 주파수 차이에 의한 비트 주파수 변화를 보여주고 있다.

Δf_c 는 다른 비동기 요인과 동일하게 정적 오차 항과 동적 오차 항으로 나눌 수 있으며, 이는 식 (15)와 같다.

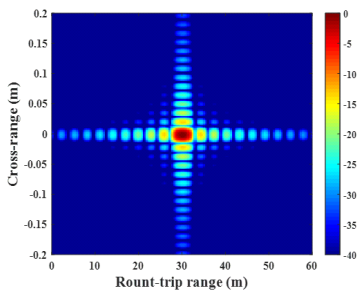
$$\Delta f_c = \Delta f_{c,static} + \Delta f_{c,dynamic} \quad (15)$$

IV. 바이스태틱 FMCW 레이더의 비동기 오차 요인들별 ISAR 영상 형성 영향 분석

본 장에서는 이전 장에서 분석한 네 가지 비동기 요인들이 ISAR 영상 형성 결과에 가하는 영향을 시뮬레이션 환경에서 분석하였다. ISAR 영상 형성을 위한 관측 시나리오 및 사용한 FMCW 레이더의 중요 지표들은 그림 8(a) 및 표 1과 같으며, 바이스태틱 ISAR 영상 형성을 위한 신호처리 알고리즘은 참고문헌 [17]을 채택하였다. ISAR 영상별 정확한 비교를 위해 단일점 산란원을 관측하였으며, 형성된 점 ISAR 영상의 정량적인 품질 분석을 위해, SAR 영상 평가를 위해 주로 사용되는 PSLR(peak sidelobe



(a) 점 산란원 표적 관측 시나리오
(a) Scenario of simulation



(b) 이상적인 점 산란원 ISAR 영상
(b) ISAR image of ideal point-scatterer

그림 8. 이상적인 FMCW 신호 취득 시 ISAR 영상 형성
Fig. 8. Ideal ISAR image of point-scatterer.

표 1. ISAR 시뮬레이션 운용 지표
Table1. Parameter of ISAR simulation.

Parameter	Value
Center frequency	77 GHz
Bandwidth	102.6 MHz
Chirp rate	16.03 MHz/ μ s
PRF	2 kHz
FMCW signal width	6.4 μ s
Coherent processing interval	2 s

ratio), ISLR(integrated sidelobe ratio), 해상도(resolution) 및 섀넌 엔트로피(Shannon entropy)를 기반으로 한 영상 엔트로피를 계산하여 이상적인 점 산란원의 ISAR 영상 품질과 비교하였다^{[18],[19]}.

4.1 이상적인 FMCW 신호 취득 시 ISAR 영상 형성

바이스태틱 FMCW 레이더 신호가 정상적으로 신호를

표 2. 점 산란원의 ISAR 영상 품질 지표

Table 2. Quality parameter of ideal point-scatterer ISAR image.

	Range	Azimuth
PSLR	-13.20 dB	-13.20 dB
ISLR	-10.25 dB	-10.14 dB
Resolution	2.61 m	0.013 m
Image entropy	5.69	

취득할 시, 다음 그림 8(b) 및 표 2와 같은 영상 및 품질 지표를 가지게 된다. 이때 PSLR은 형성된 PSF의 주엽과 부엽(sidelobe) 간의 세기 비율을 의미하며, 약 -13 dB 까지 이론적으로 가질 수 있다^[18]. ISLR은 주엽의 면적과 나머지 부엽들의 면적간의 비율을 의미하며, -10 dB가 이론적인 최솟값이다^[18]. 영상 엔트로피는 2차원 영상의 무질서도를 반영하는 지표로써, ISAR 영상의 초점이 맞을수록, 영상 엔트로피가 낮은 경향성이 있다^[19]. 해당 품질 지표들을 비교군으로 활용하여, 각 비동기 요인 별 ISAR 영상 품질 변화를 분석한다.

4.2 참조 신호 간 시간 차 발생 시 ISAR 영상 형성

상기 바이스태틱 FMCW ISAR 시뮬레이션 환경에서 참조 신호 간 시간 차, $\Delta\tau_t$ 가 발생할 경우의 ISAR 영상 결과를 분석하였다. 먼저 송·수신기 간 참조 신호가 $\Delta\tau_{t,static} = 10$ ns으로 일정한 시간 지연값 차이를 가질 때의 ISAR 영상을 형성하였으며, 이는 그림 9(a) 및 표 3과 같다. 수행 결과, 기존 ISAR 영상 내 점 표적의 위치보다 3 m 앞당겨 위치한 것을 볼 수 있으며, 이는 10 ns 시간 동안 이동한 왕복 거리값과 일치하며, $\Delta\tau_{t,static}$ 으로 인해 거리 정보 오차가 ISAR 영상 내에 발생한 것을 알 수 있다. 그 외의 ISAR 영상의 품질 지표는 변화하지 않았으며, 영상 품질에 대한 영향은 미미하였다.

다음은 $\Delta\tau_{t,dynamic}$ 이 매 버스트마다 10 ns 이하의 무작위값으로 시간 차 비동기 오차가 발생했을 때의 ISAR 영상을 형성해 보았으며, 이는 그림 9(b) 및 표 3과 같다. $\Delta\tau_{t,dynamic}$ 가 발생할 경우, 거리 방향의 해상도가 기존 이상적인 ISAR 영상의 거리 해상도보다 상승한 것을 볼 수 있으며, 방위 방향의 PSLR 및 ISLR 또한 상승하였다. 이

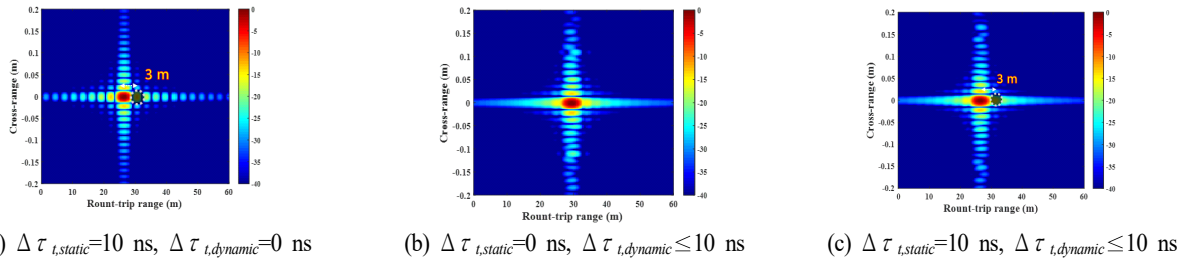


그림 9. 참조 신호 간 시간 차 비동기 오차 발생 시 ISAR 영상 형성 결과

Fig. 9. Results of ISAR images when timing asynchronization errors occur between reference signals.

표 3. 참조 신호 간 시간차 비동기 오차 발생 시 점 산란원 ISAR 영상의 품질 지표

Table 3. Quality parameters of point-scatterer ISAR images when timing asynchronization errors occur.

	$\Delta \tau_{t,static}=10$ ns, $\Delta \tau_{t,dynamic}=0$ ns		$\Delta \tau_{t,static}=0$ ns, $\Delta \tau_{t,dynamic} \leq 10$ ns		$\Delta \tau_{t,static}=10$ ns, $\Delta \tau_{t,dynamic} \leq 10$ ns	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	-13.20 dB	-13.20 dB	-15.01 dB	-13.00 dB	-15.01 dB	-13.00 dB
ISLR	-10.25 dB	-10.14 dB	-11.15 dB	-9.71 dB	-11.15 dB	-9.71 dB
Resolution	2.61 m	0.013 m	3.16 m	0.013 m	3.16 m	0.013 m
Entropy	5.69		5.94		5.94	

는 식 (6)의 비트 주파수 및 도플러 항에 $\Delta \tau_{t,dynamic}$ 항이 영향을 가하기 때문에 PSF 품질이 악화된 것으로 확인된다. 또한 영상 엔트로피가 기존 ISAR 영상 대비 상승하여 영상 품질이 하락하였다. 거리 방향의 PSLR과 ISLR이 기존 ISAR 영상보다 하락하였으며, 이는 영상 PSF가 왜곡됨에 따라 증가된 현상이다.

마지막으로 상기 두 가지의 경우를 종합한 ISAR 영상 형성을 수행하였으며, $\Delta \tau_{t,static}$ 는 10 ns로 구성, $\Delta \tau_{t,dynamic}$ 는 10 ns 이하의 무작위값을 가진다. 그림 9(c)는 상기 환경에서 형성한 점 표적 ISAR 영상이며, 영상 형성 수행 결과, 두 경우에서 발생한 거리 정보 오차 및 영상 품질 악화 문제가 모두 발생하여, 점 산란원이 ISAR 영상 내에서 3 m 이동, ISAR 영상의 PSLR, ISLR, 해상도 및 영상 엔트로피가 악화되었다.

4.3 LO 위상 잡음 차 발생 시 ISAR 영상 형성

다음으로, 각 송·수신기 LO 환경에서 발생하는 위상 잡음 간 차로 인한 비동기 현상의 ISAR 영상에 가하는 영향을 분석하였다. 먼저, FMCW LO에 발생하는 위상 잡음을 PSD 모델을 통해 생성하였으며, PSD 모델은 TI

(Texas Instruments)사 AWR 1843 모델의 위상 잡음층 레벨인 -93 dB를 따르게 하였다. 본 연구에서 형성한 PSD 모델 및 생성된 시간 축 위상 잡음 신호 예시(-93 dB)는 그림 10과 같다.

각 송·수신기별로 위상 잡음 $\varphi_T(t)$, $\varphi_R(t)$ 를 형성하였으며, 식 (9)에 의한 두 잡음 간의 위상 차가 반영된 ISAR 영상 형성 결과는 그림 11 및 표 4와 같다. 수행 결과, -93 dB의 위상 잡음 발생 시, 점 표적 ISAR 영상의 큰 변화가 없으며, PSLR, ISLR, 해상도 및 영상 엔트로피 또한 크게 변화하지 않았다.

추가적인 위상 잡음의 영향력 확인을 위해, 잡음층을

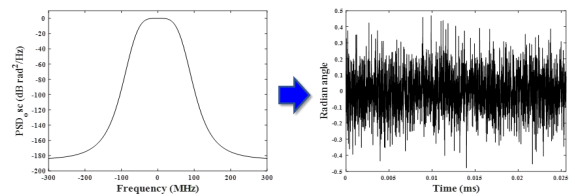


그림 10. FMCW 위상 잡음의 PSD 모델 및 생성된 시간 축 위상 잡음 신호(-93 dB)

Fig. 10. PSD model of FMCW phase noise and generated phase noise signal in time domain (-93 dB).

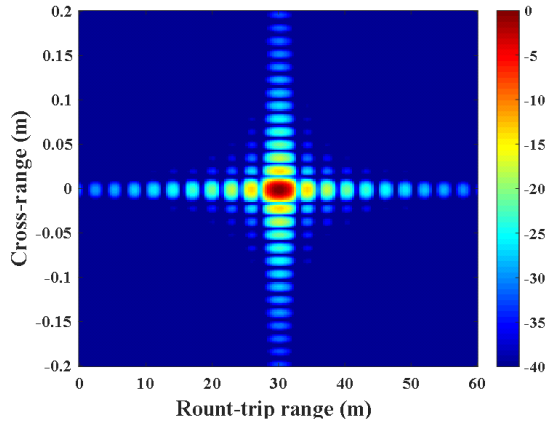


그림 11. 위상 잡음 차 발생 시 점 산란원 ISAR 영상 (-93 dB)

Fig. 11. Result of point-scatterer ISAR image when phase noise difference occurs (-93 dB).

표 4. 위상 잡음 차 발생 시 산란원 ISAR 영상의 품질 지표(-93 dB)

Table 4. Quality parameters of point-scatterer ISAR image when phase noise difference occurs (-93 dB).

	Range	Azimuth
PSLR	-13.18 dB	-13.31 dB
ISLR	-10.24 dB	-10.15 dB
Resolution	2.61 m	0.013 m
Image entropy	5.70	

20 dB 상승시킨 -73 dB로 두어 시뮬레이션을 추가 수행하였으며, 그림 12와 같다. 수행 결과, ISAR 영상이 왜곡되어 점 산란원이 나타나지 않았으며, ISAR 영상 내 신호의 주엽 성분이 존재하지 않아 표 5와 같이 PSLR, ISLR 및 해상도가 측정 불가능, 영상 엔트로피는 2배 증가한 10.07이다. 따라서 위상 잡음이 -73 dB 이상인 환경에서의 위상 잡음 비동기가 발생 시, 온전한 바이스태틱 FMCW ISAR 영상을 얻을 수 없음을 알 수 있으며, 위상 잡음 층이 상승할수록 LO 위상 잡음 간 차이로 인한 비동기 현상의 영향이 커질 수 있음을 확인하였다.

4.4 송·수신기 간 PRF 불일치 시 ISAR 영상 형성

다음으로 송·수신기 간 PRF 차이로 인한 비동기 현상

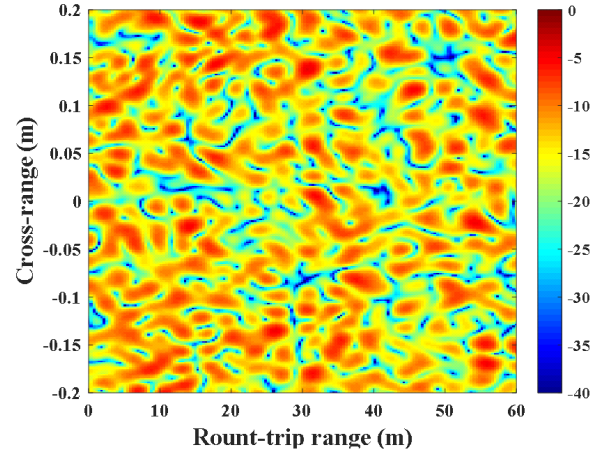


그림 12. 위상 잡음 차 발생 시 점 산란원 ISAR 영상 (-73 dB)

Fig. 12. Result of point-scatterer ISAR image of when phase noise difference occurs (-73 dB).

표 5. 위상 잡음 차 발생 시 산란원의 ISAR 영상 품질 지표(-73 dB)

Table 5. Quality parameters of point-scatterer ISAR image when phase noise difference occurs (-73 dB).

	Range	Azimuth
PSLR	Unmeasurable	
ISLR		
Resolution		
Image entropy	10.07	

이 발생할 경우의 ISAR 영상을 형성하였으며, $\Delta\tau_{p,static}$ 은 1 ns로, $\Delta\tau_{p,dynamic}$ 은 무작위로 10 ns 이하의 값을 가지게 하였다. 이전과 동일하게 총 세가지의 경우를 두어 비동기 현상을 구현하였으며, 각 경우 별 ISAR 영상 형성 및 분석 결과는 다음 그림 13 및 표 6과 같다.

$\Delta\tau_{p,static}$ 값이 1 ns를 가질 경우(그림 13(a)), 점 표적이 방위 방향으로 형성되지 못해 왜곡된 것을 볼 수 있다. 이는 두 송·수신기 간의 PRF 불일치로 인한 $\Delta\tau_{p,static}$ 성분 누적으로 range walk 현상이 일어난 것으로 그림 14와 같이 거리 측면도 영상(range profile map)에서 점 산란원의 정보가 계속 이동한다. 해당 현상은 실제 점 산란원의 이동 궤적과 다르며, ISAR 영상 형성 과정에서 온전한 방위 방향 신호 압축을 어렵게 하여 방위 방향 ISAR 영상 품

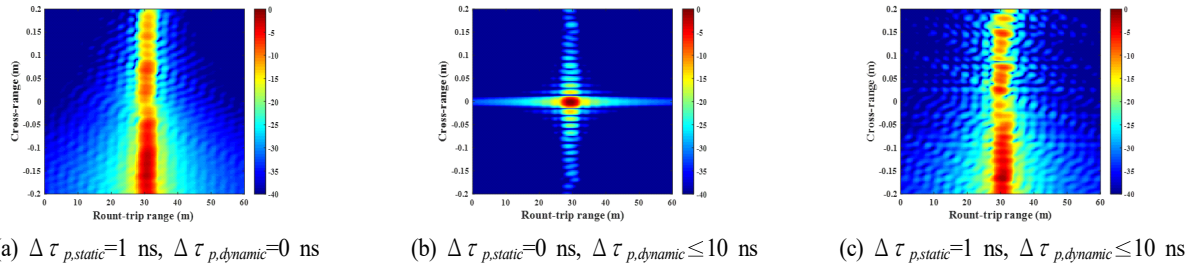


그림 13. 송, 수신기 간 PRF 불일치 비동기 현상 발생 시 ISAR 영상 형성 결과

Fig. 13. Results of ISAR images when asynchronization errors owing to PRF mismatch occur.

표 6. 송, 수신기 간 PRF 불일치 비동기 현상 발생 시 ISAR 영상의 품질 지표

Table 6. Quality parameters of point-scatterer ISAR images when asynchronization errors owing to PRF mismatch occur.

	$\Delta \tau_{p,static}=1$ ns, $\Delta \tau_{p,dynamic}=0$ ns		$\Delta \tau_{p,static}=0$ ns, $\Delta \tau_{p,dynamic}\leq 10$ ns		$\Delta \tau_{p,static}=1$ ns, $\Delta \tau_{p,dynamic}\leq 10$ ns	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	−17.19 dB	Unmeasurable	−15.04 dB	−13.07 dB	−17.13 dB	Unmeasurable
ISLR	−13.54 dB		−11.14 dB	−9.86 dB	−13.64 dB	
Resolution	3.23 m		3.16 m	0.013 m	3.09 m	
Entropy	8.14		5.94		8.19	

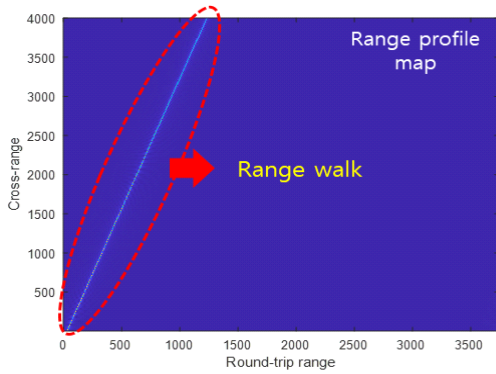


그림 14. $\Delta \tau_{p,static}=1$ ns일 경우의 range walk 현상

Fig. 14. Range walk phenomenon when $\Delta \tau_{p,static}=1$ ns.

질을 악화시킨다. 그 외에도 거리 방향 해상도 또한 증가 하였으며, PSLR, ISLR은 감소하였으나, 정확한 영상 초점 화가 진행되지 못해 영상 엔트로피가 급격히 증가하였다.

그림 13(b)는 $\Delta \tau_{p,dynamic}$ 이 10 ns 이하의 무작위 값을 가질 경우의 ISAR 영상 결과이며, 거리 방향의 해상도 및 방위 방향의 PSLR, ISLR이 악화되었다. 해당 현상은 4.2

의 참조 신호 간 발생 시간 차 인 $\Delta \tau_{p,dynamic}$ 과 유사하며, 각 버스트마다의 무작위 PRF 불일치는 참조 시간의 무작 위 시간 차와 동일한 결과를 가진다.

그림 13(c)는 상기 $\Delta \tau_{p,static}$ 및 $\Delta \tau_{p,dynamic}$ 두 성분이 동 시에 있을 경우의 ISAR 영상 형성 결과이다. $\Delta \tau_{p,static}$ 의 주요한 영향으로 방위 신호 압축이 온전히 수행되지 못 한 것을 볼 수 있으며, $\Delta \tau_{p,dynamic}$ 영향으로 영상 엔트로 피가 증가하였다.

4.5 참조 신호 간 중심 주파수 차 발생 시 ISAR 영 상 형성

마지막으로, 각 송·수신기의 참조 신호 간 중심 주파 수 차이 발생 시 점 표적 바이스태틱 ISAR 영상 변화를 분석하였다. $\Delta f_{c,static}$ 은 400 kHz일 경우를, $\Delta f_{c,dynamic}$ 은 100 kHz 이내의 무작위 값을 가질 경우로 설정하였으며, 상기 비동기 요인이 반영된 ISAR 영상 및 분석 결과는 다음 그림 15 및 표 7과 같다.

$\Delta f_{c,static}$ 이 400 kHz 인가된 경우, 그림 15(a)에서 ISAR 영상 내 점 표적이 기존 위치로부터 7.5 m 떨어진 것을

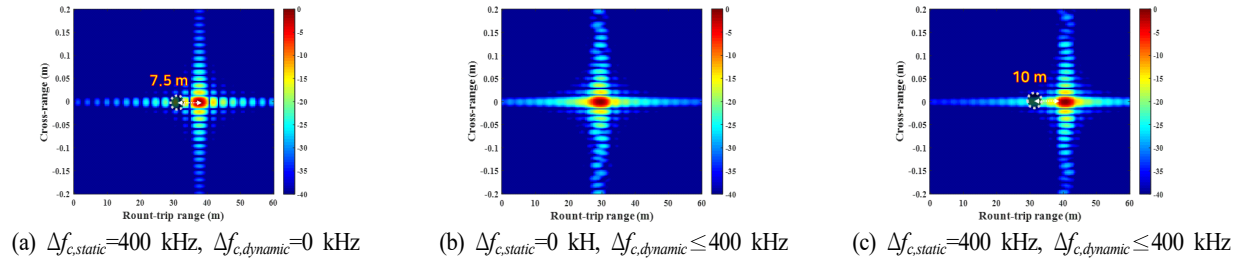


그림 15. 송, 수신기 간 중심 주파수 차이로 인한 비동기 현상 발생 시 ISAR 영상 형성 결과

Fig. 15. Results of ISAR images when center frequency asynchronization error occurs.

표 7. 송, 수신기 간 중심 주파수 차이로 인한 비동기 현상 발생 시 ISAR 영상의 품질 지표

Table 7. Quality parameters of point-scatterer ISAR images when center frequency asynchronization error occurs.

	$\Delta f_{c,static}=400$ kHz, $\Delta f_{c,dynamic}=0$ kHz		$\Delta f_{c,static}=0$ kHz, $\Delta f_{c,dynamic}\leq 400$ kHz		$\Delta f_{c,static}=400$ kHz, $\Delta f_{c,dynamic}\leq 400$ kHz	
	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth
PSLR	-13.38 dB	-13.26 dB	-14.19 dB	-13.54 dB	-14.43 dB	-13.15 dB
ISLR	-10.28 dB	-10.11 dB	-12.29 dB	-9.86 dB	-12.01 dB	-9.71 dB
Resolution	2.58 m	0.013 m	3.23 m	0.013 m	3.01 m	0.013 m
Entropy	5.69		6.02		5.93	

볼 수 있으며, 이는 식 (14)에 $\Delta f_{c,static}$ 대입 시, 약 7.5 m 가 계산되어 두 값이 일치한다. 따라서 $\Delta f_{c,static}$ 은 FMCW 신호의 비트 주파수에 오차를 발생시킬 수 있으며, 이는 식 (14)에 의해 반영된다.

$\Delta f_{c,dynamic}$ 이 무작위 400 kHz 이하의 값을 가질 경우, 그림 15(b)에서 거리 방향의 해상도, 방위 방향의 PSLR, ISLR이 악화되었으며, 영상 엔트로피 또한 상승하였다. 따라서 $\Delta f_{c,dynamic}$ 또한 디램핑된 FMCW 레이다 신호의 비트 주파수에 무작위 오차를 가함으로써 ISAR 영상에 영향을 주는 것으로 판단된다.

마지막으로 상기 두 가지 변수가 합쳐진 경우의 ISAR 영상을 형성 및 분석하였으며, 그림 15(c) 및 표 7과 같다. 상기 $\Delta f_{c,static}$ 및 $\Delta f_{c,dynamic}$ 두 요소의 영향이 ISAR 영상 내에 나타났으며, 점 표적의 10 m 거리 오차, 거리 해상도, 방위 PSLR, ISLR 및 영상 엔트로피 악화가 발생하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 바이스태틱 FMCW 레이다 시스템에서

발생할 수 있는 비동기 현상들을 송·수신기 내 참조 신호 간 시간 차, 위상 잡음 차, PRF 차 및 중심 주파수 차 네 가지 요인으로 두어 신호 모델을 구성하였으며, ISAR 영상 형성 시뮬레이션을 수행 및 결과 분석을 통해 각 비동기 요인들이 ISAR 영상에 끼치는 영향을 확인하였다. 그 결과, 참조 신호 간의 시간 차, PRF 차 및 중심 주파수 차이는 ISAR 영상의 거리 정보 정확도를 낮출 수 있으며, ISAR 영상 품질 또한 악화될 수 있음을 확인하였다. 위상 잡음 차는 -93 dB의 잡음층 환경에서는 유의미한 결과를 보여주지 않았으며, -73 dB일 경우, 두 위상 잡음 차의 세기가 강해, ISAR 영상이 왜곡되어 온전한 ISAR 영상 형성이 불가능하였다.

본 연구에서 분석한 바이스태틱 FMCW 레이다의 비동기 현상은 공통적으로 참조 신호 간의 시간 차를 유발하여 비트 주파수에 오차를 가하는 특징이 있다. 참조 신호 간 발생 시간 차뿐만 아니라, PRF 불일치 중 동적 오차 및 참조 신호 간 중심 주파수 차이가 동일한 현상으로 점 표적의 거리 정보에 오차를 가하였으며, ISAR 영상 품질에 악영향을 주었다. 따라서, 바이스태틱 동기화를 위한

하드웨어 설계 및 연구를 수행하기 위해서는 각 요소별 하드웨어 조정 과정에서 거리 정보 및 PSF, 영상 품질 변화 확인이 필요하다. 이를 본 논문에서 제안한 바이스태틱 FMCW 비동기 오차 신호 모델을 활용한다면 각 비동기 요소 별 영향력을 보다 유용히 확인할 수 있을 것이라 예상된다. LO에서 발생하는 위상 잡음 PSD 모델은 PLL, 발진기 등의 하드웨어 성능에 의해 변화하기 때문에 FMCW 레이더 시스템 구성에 따라 다양한 PSD 모델이 나타날 수 있다. 따라서 하드웨어 단계에서의 PSD 신호 모델 분석 과정이 향후 연구로 요구된다.

본 연구는 추후 바이스태틱 구조를 가지는 FMCW SAR 및 ISAR 레이더 시스템의 동기화 연구를 위한 초기 연구이며, 제안한 비동기 신호 모델을 기반으로 보다 정밀한 바이스태틱 FMCW 레이더 동기화 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] M. Jankiraman, *FMCW Radar Design*, Norwood, MA, Artech House, 2018.
- [2] A. Bekar, M. Antoniou, and C. J. Baker, "Low-cost, high-resolution, drone-borne SAR imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-11, Jun. 2021.
- [3] W. K. Lee, K. W. Lee, "Experimental operation of drone micro-SAR with efficient time-varying velocity compensation," *Electronics Letters*, vol. 53, no. 10, pp. 682-683, May 2017.
- [4] L. Weixian, F. Hongchuan, and L. Yilong, "Ka-band drone SAR flying without GPS," in *2021 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Bali, Nov. 2021, pp. 1-4.
- [5] J. S. Lee, H. Y. Lee, Y. J. Kim, and C. S. Cho, "SAR ADC for a multimode radar transceiver with offset calibration," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 4, pp. 427-433, Jul. 2022.
- [6] Y. G. Kang, D. H. Jung, G. H. Shin, C. K. Kim, and S. O. Park, "A study on the feasibility of stop-and-go approximation in FMCW SAR," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 3, pp. 210-217, Apr. 2022.
- [7] Y. Liu, Y. K. Deng, R. Wang, and O. Loffeld, "Bistatic FMCW SAR signal model and imaging approach," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 3, pp. 2017-2028, Jul. 2013.
- [8] L. Feng, H. Wang, S. Zheng, Q. Zhao, Z. Zeng, and X. Chen, "Spaceborne bistatic FMCW SAR imaging method based on FS algorithm," in *2021 2nd China International SAR Symposium (CISS)*, Shanghai, Nov. 2021, pp. 1-5.
- [9] Y. Li, Siu O'Young, "Focusing bistatic FMCW SAR signal by range migration algorithm based on Fresnel approximation," *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 32123-32137, Dec. 2015.
- [10] G. Krieger, "Advanced bistatic and multistatic SAR concepts and applications," in *European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Dresden, May 2006, pp. 1-101.
- [11] P. Dubois-Fernandez, H. Cantalloube, B. Vaizan, G. Krieger, R. Horn, and M. Wendler, et al. "ONERA-DLR bistatic SAR campaign: Planning, data acquisition, and first analysis of bistatic scattering behaviour of natural and urban targets," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 153, no. 3, pp. 214-223, Jun. 2006.
- [12] C. Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [13] W. G. Carrara, R. M. Majewski, and R. S. Goodman, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*, Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [14] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1999.
- [15] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, pp. 108-110,

2005.

- [16] K. Siddiq, M. K. Hobden, S. R. Pennock, and R. J. Watson, "Phase noise in FMCW radar systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 1, pp. 70-81, Feb. 2018.
- [17] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR cross-range scaling," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp.

1962-1973, Aug. 2017.

- [18] J. C. Curlander, R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1991.
- [19] L. Xi, L. Guosui, and J. Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 1240-1252, Oct. 1999.

이 경 민 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1999-5242>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2020년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2020년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] SAR/ISAR 및 레이더 신호

처리

신 희 섭 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4777-2553>



2004년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학전공 (공학석사)
 2009년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학전공 (공학박사)
 2009년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] SAR 신호처리

이 인 성 [영남대학교/석사과정]

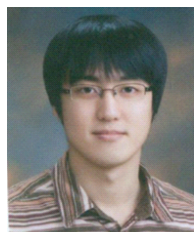
<https://orcid.org/0000-0003-1145-2064>



2022년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2022년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초소형 레이더 센서 H/W 개발 및 신호처리

옥 재 우 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6576-6467>



2009년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2011년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2011년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] SAR

윤 재 혁 [LIG넥스원/수석연구원]

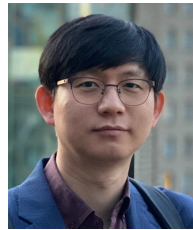
<https://orcid.org/0000-0002-3837-1494>



2010년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학 석사)
2014년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학 박사)
2014년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 추적 알고리즘

양 중 렬 [건국대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4939-3274>



2003년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
2009년 1월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
2009년 2월~2011년 10월: 삼성전자 S.LSI 사업부 책임연구원
2011년 11월~2016년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기기연구본부 선임연구원
2016년 9월~2023년 2월: 영남대학교 전자공학과 부교수
2022년 9월~2023년 2월: UCSB ECS Visiting Scholar
2023년 3월~현재: 건국대학교 전기전자공학부 부교수
[주 관심분야] 밀리미터파 집적회로 및 응용시스템, 원격 생체 신호검출/분석용 레이더 센서, 준 테라헤르츠 비파괴 영상 시스템

유 응 노 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2255-6531>



2001년 2월: 한양대학교 전자전기공학 (공학사)
2003년 2월: 한양대학교 전자전기공학 (공학석사)
2003년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] SAR 체계개발

김 경 태 [포항공과대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수
2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장
2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정