

# Master-Slave 구조를 통한 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템 구성 및 ISAR 영상 형성 연구

## A Study on the Bi-Static FMCW Radar System Configuration and ISAR Imaging Via Master-Slave Structure

이인혁 · 조민곤 · 김현동 · 신희섭\* · 옥재우\* · 백민영\* · 유응노\* · 김경태

In-Hyeok Lee · Min-Gon Cho · Hyun-Dong Kim · Hee-Sub Shin\* ·  
Jae-Woo Ok\* · Min-Young Back\* · Eung-Noh You\* · Kyung-Tae Kim

### 요 약

ISAR(inverse synthetic aperture radar)은 기상 조건 또는 광량과 관계없이 고해상도 영상을 형성할 수 있는 레이다 시스템이다. FMCW(frequency modulated continuous wave) 기법은 ADC(analog-to-digital conversion) sampling rate를 크게 낮추며 펄스 기반 레이다가 가진 시스템 크기의 한계를 극복했다. 그 결과, 레이다 시스템의 활용도가 크게 높아졌으며 다양한 분야에 활용되고 있다. 바이스테틱 레이다는 송신기와 수신기를 분리함으로써 표적이 가진 다양한 산란 특성을 유도할 수 있으며 해상도 향상 등 모노스테틱 레이다와 구별되는 장점들이 있다. 그러나, 바이스테틱 FMCW 레이다를 운용하기 위해서는 신호의 동기화 문제를 해결해야 한다. 본 논문에서는 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템이 가지는 동기 오차 문제와 master-slave 구조를 통해 동기화 문제를 해결하는 구조, 그리고 실제 환경에서 ISAR 영상을 형성한 결과를 제시하였다.

### Abstract

An inverse synthetic aperture radar (ISAR) is a radar system capable of forming high-resolution images regardless of weather conditions or light levels. The frequency-modulated continuous wave (FMCW) technique overcomes the system size limitations of pulse-based radars by significantly reducing the analog-to-digital conversion (ADC) sampling rate, consequently increasing the versatility of radar systems, leading to their widespread application in various fields. By separating the transmitter and receiver, bistatic radar can exploit the diverse scattering characteristics of targets and offers advantages such as improved resolution compared with monostatic radar. However, the operation of a bistatic FMCW radar must solve the problem of signal synchronization. This study presents the challenges of bistatic FMCW radar systems, proposes a master - slave structure to address synchronization issues, and demonstrates the formation of ISAR images in real-world scenarios.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar, Bi-Static Radar, Frequency Modulated Continuous Wave, Synchronization Error

「이 연구는 LIG넥스원 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

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

\*LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd)

· Manuscript received March 19, 2024 ; Revised March 25, 2024 ; Accepted April 24, 2024. (ID No. 20240319-026)

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

## I. 서 론

선형 변조(LFM, linear frequency modulated) 신호를 활용한 레이다는 펄스(pulse) 타입과 주파수 변조 연속파(FMCW, frequency modulated continuous wave) 타입으로 구분된다. 펄스 레이다는 짧고 강한 신호를 송·수신하며, 정합 필터(matched filter)를 활용해 거리 압축(range compression)을 수행한다. 반면, FMCW 레이다는 상대적으로 긴 신호를 송·수신하며, stretch processing을 통해 거리 압축을 수행한다. 이를 통해 FMCW 레이다는 펄스 레이다에 비해 매우 낮은 ADC(analog-to-digital conversion) sampling rate를 활용해 신호를 복원할 수 있다<sup>[11]~[13]</sup>. 결과적으로, 레이다 시스템은 FMCW 시스템의 활용을 통해 소형화를 이루었으며 재난감시 등의 다양한 민수 분야에 활용도를 높이고 있다.

역합성 개구면 레이다(ISAR, inverse synthetic aperture radar)는 레이다를 활용해 전자기파를 송·수신하여 움직이는 표적에 대한 영상을 형성하는 시스템이다<sup>[4]~[9]</sup>. ISAR 시스템은 기후와 광량에 무관하게 고해상도 영상을 형성할 수 있으나, 펄스 신호 기반의 ISAR는 시스템의 크기와 운용비용의 한계 등의 이유로 제한적으로 활용되었다. 따라서, FMCW 신호를 활용함으로써 ISAR 시스템의 활용도를 크게 높일 수 있다.

바이스테틱 레이다 시스템은 송신기와 수신기를 공간적으로 분리한 시스템으로 모노스테틱 레이다와 달리 다양한 각도 및 기하학적 구조에서 표적에 대한 정보를 획득할 수 있다. 또한, 해상도 향상 등의 방식을 통해 영상 품질 향상이 가능하므로 바이스테틱 레이다를 활용한 ISAR 영상 형성 기법 연구가 활발히 수행되었다<sup>[10]~[12]</sup>. 그러나, 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템에는 송신기와 수신기의 비동기 문제가 존재한다<sup>[13]</sup>.

FMCW 레이다가 거리 압축을 위해 활용하는 stretch processing은 송신 신호와 기준 신호의 주파수 혼합(mixing)을 통해 필요 ADC sampling rate를 극단적으로 낮춘 거리 압축 기법이다<sup>[14]</sup>. 모노스테틱 FMCW 레이다 시스템은 송신기의 신호 생성을 위한 전압 제어 발진기(VCO, voltage controlled oscillator)가 수신기의 국부 발진기(LO, local oscillator)의 역할을 함께 수행하므로 주파수

혼합이 용이하다. 그러나, 바이스테틱 레이다 시스템은 송신기와 수신기의 LO 신호가 서로 다르다. 잘못된 기준 신호를 활용한 수신기의 주파수 혼합 과정은 여러 문제를 초래한다. 특히, 송신기와 수신기의 시간 차이로 인한 비동기 현상은 거리 추정에 오차를 유발하며, 송신기와 수신기의 신호 반복 주파수(PRF, pulse repetition frequency) 차이는 신호 반복 주기마다 오차를 누적시켜 ISAR 영상 품질을 크게 악화시킨다<sup>[13]</sup>. 따라서, 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템을 구성할 때는 송신기와 수신기의 비동기 문제를 해결해야 한다.

기존의 바이스테틱 레이다 시스템의 동기화 연구는 송신기와 수신기의 동기를 맞추기 위해 외부의 기준 클럭(reference clock) 신호를 활용했다<sup>[15]</sup>. 기준 클럭 신호는 송신기와 수신기가 LO 신호를 발생시키는 기준 시간을 전달하는 역할을 하며 이는 앞서 언급한 두 가지 문제를 해결할 수 있다. 그러나, 우선으로 전달하는 방식의 기준 클럭 신호는 바이스테틱 구조의 물리적 제약을 야기하며 무선으로 전달하는 방식의 기준 클럭 신호는 레이다 시스템의 물리적 크기를 크게 만들어 활용도를 낮추는 문제가 존재한다.

최근 외부의 기준 클럭 신호를 활용하지 않고 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템의 비동기 문제를 해결하기 위한 칩이 연구되었다<sup>[16]</sup>. 개발된 칩은 레이다 신호를 송신함과 동시에 물리적으로 분리된 통신 채널을 통해 수신기의 LO 신호를 수신기로 송신한다. 수신기는 통신 채널을 통해 수신한 송신기의 LO 신호와 반사 신호의 주파수 혼합을 수행해 앞서 언급한 비동기 문제를 해결했다. 본 연구에서는 개발된 칩을 활용해 비동기 문제를 해결할 수 있는 논리적 근거를 소개하고 실제 환경에서의 ISAR 영상 형성을 통해 제안된 기법의 유효성을 검증했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템과 동기화 문제에 대해 구체적으로 기술했다. III장에서는 ISAR 영상 형성을 통해 제안된 바이스테틱 FMCW 시스템의 유효성을 검증한 방식을 기술했다. IV장에서는 제안된 시스템을 통해 실제 환경에서 ISAR 영상을 형성한 결과를 제시했다. 마지막으로 V장에서 본 연구의 결론을 기술했다.

## II. 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템 구성

### 2.1 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템의 비동기로 인한 시간 지연

본 절에서는 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템이 가진 동기화 문제로 인한 시간 지연 오차를 소개한다. 그림 1은 일반적인 바이스테틱 레이더 시스템의 구조이다.

FMCW 레이더는 고해상도 영상 형성을 위해 식 (1) 및 식 (2)와 같은 LFM 신호를 반복적으로 송신한다.

$$s(t, \eta) = \omega_r(t) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{K_r}{2} t^2\right)\right) \quad (1)$$

$$\omega_r(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $\omega_r(t)$ 는 거리 윈도우,  $f_c$ 는 캐리어 주파수,  $K_r$ 은 처프 비율(chirp rate),  $t$ 는 빠른 시간(fast-time),  $\eta$ 는 느린 시간(slow-time),  $T_p$ 는 송신 신호의 길이이다.

송신된 신호는 시간 지연의 발생으로 인해 식 (3)과 같이 수신기에 도달한다.

$$s_r(t, \eta) = A_0 \omega_r(t - \tau_d(\eta)) \times \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_d(\eta)) + \frac{K_r}{2}(t - \tau_d(\eta))^2\right)\right) \quad (3)$$

여기서  $A_0$ 는 산란 원의 세기,  $c$ 는 빛의 속도,  $\tau_d = \frac{R_1(\eta) + R_2(\eta)}{c}$ 는 시간 지연,  $R_1$ 은 송신기와 표적 사이의 거리,  $R_2$ 는 표적과 수신기 사이의 거리이다.

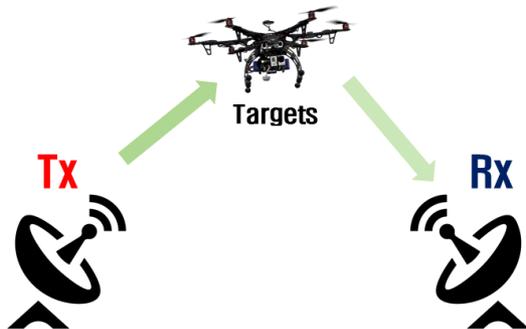


그림 1. 바이스테틱 레이더 시스템 구조  
Fig. 1. The structure of bi-static radar system.

그림 2는 주파수 혼합 과정에서 동기 오차가 존재하는 기준 신호와 수신 신호를 도시한다. 여기서,  $\tau_d'$ 는 수신기의 LO 신호의 타이밍이 송신기와 다를 때 발생하는 오차  $\tau_{err}$ 를 포함한 시간 지연이다.

FMCW 레이더는 식 (4)와 같이 송신 신호와 수신 신호의 곱을 통해 주파수 혼합을 수행한다.

$$s_{bb,ideal}(t, \eta) = s_r^*(t, \eta) s(t, \eta) \quad (4)$$

모노스테틱 FMCW 레이더는 주파수 혼합 과정에서 송신 신호와 동일한 신호를 기준 신호로 식 (4)의 연산을 수행하며 그 결과는 식 (5)와 같다.

$$s_{bb,ideal}(t, \eta) = A_0 \omega_r(t - \tau_d(\eta)) \times \exp\left(j2\pi\left(f_c \tau_d(\eta) + K_r \tau_d(\eta) t - \frac{K_r}{2} \tau_d^2(\eta)\right)\right) \quad (5)$$

바이스테틱 FMCW 레이더가 동기가 맞지 않는 경우 식 (4)는 식 (6)과 같이 오차를 포함한 형태로 수행된다.

$$s_{bb,err}(t, \eta) = s_r^*(t, \eta) s(t - \tau_{err}, \eta) = A_0 \omega_r(t - \tau_d(\eta)) \times \exp\left(j2\pi\left(f_c(\tau_d(\eta) - \tau_{err}) + K_r(\tau_d(\eta) - \tau_{err})t + \frac{K_r}{2}(\tau_d^2 - \tau_{err}^2)\right)\right) \quad (6)$$

여기서  $\tau_{err}$ 는 서로 다른 LO 신호로 인해 발생한 동기

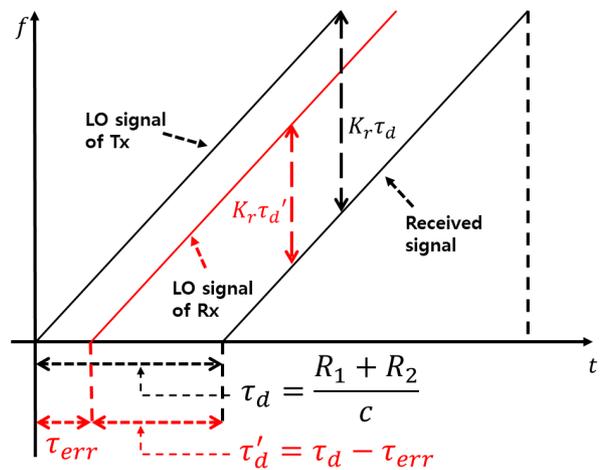


그림 2. 바이스테틱 FMCW 레이더 주파수 혼합 과정  
Fig. 2. The mixing process of bi-static FMCW radar.

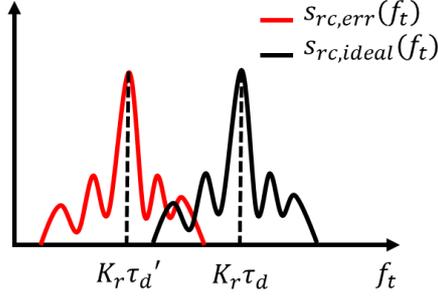


그림 3. 동기화 오차를 포함한 바이스테틱 FMCW 레이다 거리 압축 결과

Fig. 3. The result of the range compression of the bi-static FMCW radar including synchronization error.

화 오차의 크기이다.

주파수 혼합 이후 수신된 신호는 디지털 신호로 저장되며 수신 신호의 거리 압축은 푸리에 변환을 통해 수행된다.

그림 3의  $s_{rc,ideal}(f_t)$ 와  $s_{rc,err}(f_t)$ 는 각각 식 (5) 및 식 (6)의  $t$ 에 대한 푸리에 변환을 수행한 결과이다. 여기서 푸리에 변환은 각각의 신호에 대해 수행되었으므로  $\eta$ 는 고정되어 있으며,  $f_t$ 는 빠른 주파수(fast-frequency)이다. 식 (5) 및 식 (6)에서  $t$ 를 포함한 위상만을 고려했을 때  $\tau_d' = \tau_d - \tau_{err}$  라고 볼 수 있다. Stretch processing은 표적과 레이다 사이의 거리가  $f_t$  축과 비례하므로 동기화 오차의 크기가 거리 추정 오차의 크기와 비례함을 알 수 있다.

## 2-2 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템의 비동기로 인한 PRF 오차 누적

송신기와 수신기가 서로 다른 LO 신호를 생성하는 바이스테틱 시스템에서는 두 신호의 PRF가 일치한다고 가정하기 어렵다. 본 절에서는 서로 다른 PRF를 사용하는 송신기와 수신기가 ISAR 영상에 미치는 영향을 소개한다.

식 (7)은 서로 다른 PRF로 인한 오차가 발생한 수신 신호이다.

$$s_{r,PRF}(t,\eta) = A_0\omega_r(t - \tau_d(\eta) - \tau_{PRF}(\eta)) \times \exp(j2\pi(f_c(t - \tau_d(\eta) - \tau_{PRF}(\eta)) + \frac{K_r}{2}(t - \tau_d(\eta) - \tau_{PRF}(\eta))^2)) \quad (7)$$

여기서  $\tau_{PRF}(\eta)$ 는 서로 다른 PRF로 인해 발생한 시간 지연 오차이며 신호가 반복될 때마다 누적되므로  $\eta$ 에 정비례한다.

식 (7)과 같이 수신된 신호는 식 (4)의 과정 이후 식 (8)과 같이 표현된다.

$$s_{bb,PRF}(t,\eta) = s_{r,PRF}^*(t,\eta)s(t,\eta) = A_0\omega_r(t - \Delta\tau(\eta)) \times \exp(j2\pi(f_c\Delta\tau(\eta) + K_r\Delta\tau(\eta)t - \frac{K_r}{2}\Delta\tau(\eta)^2)) \quad (8)$$

여기서  $\Delta\tau(\eta) = \tau_d(\eta) + \tau_{PRF}(\eta)$ 이며 PRF 오차의 영향을 관찰하기 위해  $\tau_{err}$ 는 발생하지 않았다고 가정한다. PRF 누적 오차를 포함하고 있는 식 (8)은  $t$ 에 대한 푸리에 변환 이후에 식 (9)와 같이 거리 압축된다.

$$s_{rc,PRF}(f_t,\eta) = A_0T_p \text{sinc}(\pi T_p(\frac{K_r\Delta\tau L(\eta)}{2} - f_t)) \times \exp(-j2\pi(\Delta\tau(\eta) + \frac{T_p}{2})(f_t - \frac{K_r\Delta\tau(\eta)}{2})) \times \exp(j2\pi f_c\Delta\tau(\eta) - j\pi K_r\Delta\tau(\eta)^2) \quad (9)$$

식 (9)를 통해 PRF 오차가 발생한 바이스테틱 시스템은 거리 압축 이후에 표적의 움직임과 무관하게 레인지 워크(range walk) 현상이 발생했음을 알 수 있으며 이는 수직-거리 압축을 불가능하게 만든다.

## 2-3 신호 동기 문제 해결을 위한 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템의 구조

기존의 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템의 동기화 연구는 일반적으로 다음의 그림 4와 같이 수행되었다. 송신기와 수신기의 PRF와 비교해 높은 주파수의 기준 클럭 신호는 신호 동기를 맞추기 위한 기준이 될 수 있다. 따라서 그림 4의 구조는 송신기와 수신기가 같은 시점에 신호를 발생하도록 한다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 전선을 통해 기준 클럭 신호를 전달하는 경우, 송신기와 수신기의 위치 관계가 강제되며 레이다가 다양한 플랫폼(위성, 항공기 등)에 장착될 때 지상과의 연결이 불가능하다. 따라서 무선 통신 채널을 통해 기준 클럭 신호를 송신기와 수신기에 전달하는 연구가 수행되어왔다. 하지만, 이

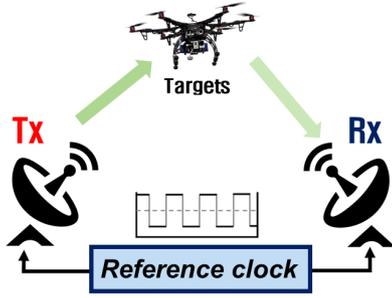


그림 4. 외부 동기 신호를 활용한 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템 구조  
 Fig. 4. The structure of bi-static FMCW radar system using external reference clock.

를 위해 레이더 시스템은 별도의 무선 통신 시스템이 필요하다. 따라서, 무선 통신을 활용한 기준 클럭 신호의 전달은 전체 시스템의 크기를 키우므로, 이는 FMCW 레이더를 활용하는 목적을 해친다.

본 연구에서는 그림 5와 같은 master-slave 구조를 통해 바이스테틱 레이더 시스템을 구성했다. 구체적으로, 제안된 구조에서 master는 송신기의 역할을 하며 신호 (1)을 두 개의 채널로 방사한다. 여기서 한 채널은 표적을 향하여 송신 신호로 활용하며, 다른 채널은 수직 방향으로 신호를 방사하여 동기화(synchronization) 신호로 활용한다.

방사된 송신 신호는 표적에 반사되어 식 (3)의 형태로 slave(수신기)의 반사 신호의 수신을 위한 채널에 전달된다. 이때, 수신기의 또 다른 채널에는 식 (10)의 형태로 동기화 신호가 도달한다.

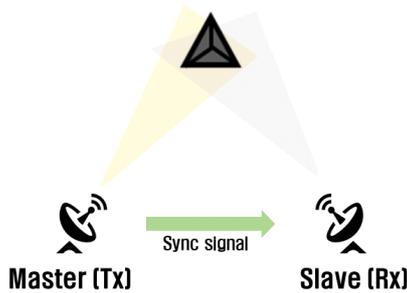


그림 5. Master-slave 구조를 통한 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템 구조  
 Fig. 5. The structure of bi-static radar system via master-slave structure.

$$s_{sync}(t, \eta) = A_0 \omega_r (t - \tau_{sync}) \times \exp(j2\pi(f_c(t - \tau_{sync}) + \frac{K_r}{2}(t - \tau_{sync})^2)) \quad (10)$$

여기서  $\tau_{sync}$ 는 송신기와 수신기의 거리 차이에 의해 발생하며 이는 레이더의 위치를 통해 계산할 수 있다.

Slave는 반사 신호와 동기화 신호를 수신 후 식 (11)과 같이 주파수 혼합 과정을 수행한다.

$$s_{bb}(t, \eta) = s_r^*(t, \eta) s_{sync}(t, \eta) = A_0 \omega_r (t - \tau_d(\eta)) \times \exp(j2\pi(f_c(\tau_d(\eta) - \tau_{sync}) + K_r(\tau_d(\eta) - \tau_{sync})t + \frac{K_r}{2}(\tau_{sync}^2 - \tau_d^2(\eta)))) \quad (11)$$

이후의 거리 압축 과정에서  $\tau_{sync}$ 가 유발하는 거리 오차는  $R_{err} = \tau_{sync} * c$ 의 관계를 통해 보상할 수 있다.

결론적으로, 제안된 구조는 별도의 기준 클럭 신호의 도움 없이 송신기와 수신기의 동기 문제를 해결할 수 있다.

### III. FMCW ISAR 영상 형성을 통한 바이스테틱 FMCW 시스템 검증

본 연구에서는 ISAR 영상 형성을 통해 제안된 바이스테틱 FMCW 시스템 구성의 유효성을 검증했다. ISAR 영상 형성은 거리(range)와 수직-거리(cross-range) 두 방향의 압축이 수행되어야 하며, 특히 수직-거리 방향은 반복된 신호의 송, 수신을 통해 표적의 도플러(Doppler) 성분의 변화를 활용한다. 따라서, 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성함으로써 제안된 바이스테틱 FMCW 레이더 시스템 유효성을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 ISAR 영상 형성은 그림 6의 기하구조를 따르며 RLOS(radar line of sight)는 레이더 시선 방향, IPP(image projection plane)는 영상 투영 평면을 의미한다.

동기화 신호를 통해 공간적으로 분리된 송신기와 수신기 사이의 동기 문제를 해결하면 거리 압축된 신호는 식 (12)와 같이 표현된다.

$$s_{rc,ideal}(x, \eta) = A_0 \text{sinc}(x - x_0) \times \exp(j \frac{4\pi f_c}{c} R(\eta)) \quad (12)$$

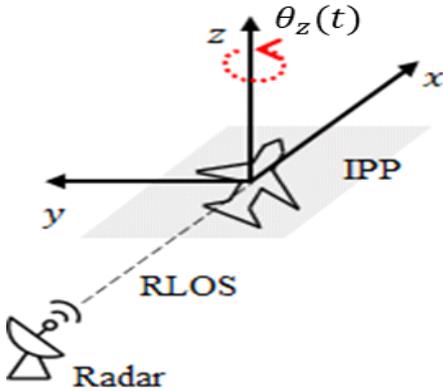


그림 6. ISAR 기하구조  
Fig. 6. The geometry of ISAR imaging.

여기서  $x = \frac{c}{2K_r} f_i$ , 표적은 단일 산란원으로 가정되었 으며, 이는 일반성을 잃지 않고 여러 산란원으로 확장될 수 있으며,  $\eta$ 에 따른 거리( $R(\eta)$ )는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$R(\eta) = R_T(\eta) + x_0 + y_0\theta_z(\eta) \tag{13}$$

여기서  $R_T(\eta)$ 는 RLOS(x축) 위에서의 표적의 움직임을 뜻하며,  $x_0$ 와  $y_0$ 는 각각 표적의 x축과 y축 위에서의 초기 좌표,  $\theta_z(\eta)$ 는 회전 축(z축)을 기준으로 한 표적의 회전 운동을 의미한다.

바이스테틱 FMCW ISAR 시스템에서 송신기와 수신기의 비동기 현상은 앞서 언급한 거리 오차, 레인지 워크(range walk) 현상 및 신호 대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)의 저하 등을 유발한다<sup>[13]</sup>. 본 연구에서는 비동기 현상으로 인해 유발된 거리 오차 및 레인지 워크 현상에 주목하기 위해 식 (13)에서  $R_T(\eta) \approx 0$ 으로 병진 운동(translational motion)이 없는 표적을 활용했다. 또한, 복잡한  $\theta_z(\eta)$ 는 고도화된 신호처리를 통해 보상되어야 하며 이는 대부분 오차를 포함한다. 본 연구에서는 구성된 시스템에 집중하기 위해  $\theta_z(\eta) \approx \theta_z\eta$ 와 같이 등속 회전 운동하는 표적을 활용했다.

$R_T(\eta) \approx 0$ ,  $\theta_z(\eta) \approx \theta_z\eta$ 인 표적을 통해 형성된 거리 압축 신호 식 (12)는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$s_{rc,ideal}(x,\eta) \approx A_0 \text{sinc}(x-x_0) \times \exp(j\frac{4\pi f_c}{c}(x_0+y_0\theta_z\eta)) \tag{14}$$

ISAR 영상은 식 (14)의  $\eta$ 에 대한 푸리에 변환을 통해 도플러 영역에서 식 (15)와 같이 형성된다.

$$s_{img}(x,f_\eta) = A_0 \text{sinc}(x-x_0) \times \text{sinc}(f_\eta - \frac{2c\theta_z}{f_c}y_0) \tag{15}$$

여기서  $f_\eta$ 는 느린 주파수(slow-frequency)이다. 식 (15)와 같이 성공적으로 압축된 표적은 푸리에 변환의 결과 거리 및 수직-거리 모두 근사적으로 싱크(sinc) 함수 형태의 윈도우를 가진다<sup>[17]</sup>. 그러나, 비동기 현상이 발생한 FMCW 시스템의 경우, 점 표적이 성공적으로 압축될 수 없으므로 싱크 함수 형태의 윈도우를 가질 수 없다<sup>[13]</sup>. 따라서, 점 표적의 점 퍼짐 함수(PSF, point spread function)와 싱크 함수의 유사도 분석을 통해 시스템의 유효성을 검증할 수 있다.

#### IV. 바이스테틱 FMCW ISAR 영상 형성 결과

이 장에서는 제안된 바이스테틱 FMCW 시스템을 바탕으로 수행한 ISAR 영상 형성의 실험 결과를 제시했다.

그림 7은 그림 5에서 제시한 개념도를 실제로 구성한 결과이다. 레이다 송신기와 수신기 중심 사이의 거리는 약 30 cm, 통신 안테나 사이의 거리는 약 15 cm로 실험을 진행하였다. 레이다 송신 신호와 통신 신호는 안테나를 수직으로 배치함으로써 간섭을 피할 수 있다.

그림 8은 본 연구에서 활용한 표적과 표적 이동 플랫폼

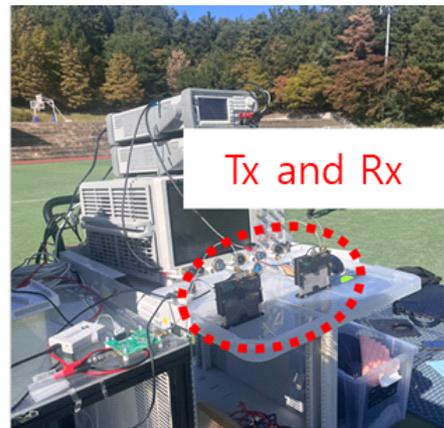


그림 7. 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템 구성  
Fig. 7. The composition of bi-static FMCW radar system.

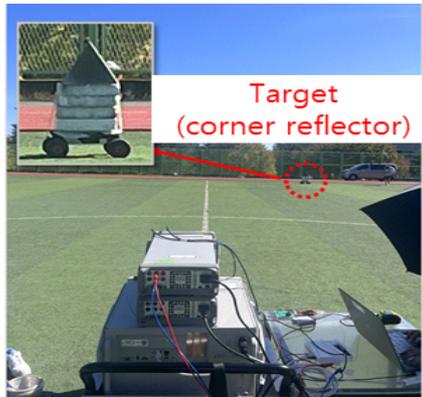


그림 8. ISAR 영상 형성 실험 표적  
Fig. 8. The target for the ISAR imaging experiments.

이다. 카트 위에 코너 리플렉터(corner reflector)를 배치해 점 표적에 대한 영상 형성 실험을 수행했다.

그림 8의 표적은 그림 9와 같이 약 30 m 거리에서 회전 운동을 수행했다.

실험에 사용된 신호의 정보는 표 1과 같다.

그림 10은 실험을 통해 형성한 ISAR 영상, 그림 11은 표적을 확대한 ISAR 영상이며 0 m 근방의 강한 신호는 leakage, DC 잡음 등의 신호이다.

그림 12 및 그림 13은 각각 실험 결과 형성된 거리와 수직-거리 방향의 점 표적의 PSF이다. 각각의 PSF의 PSLR(peak to sidelobe ratio) 및 ISLR(integrated sidelobe ratio)는 표 2와 같다.

이상적으로 압축된 점 표적에 대한 PSF는 싱크 함수의 형태로 (-13 dB)의 PSLR과 (-10 dB)의 ISLR을 가진다.

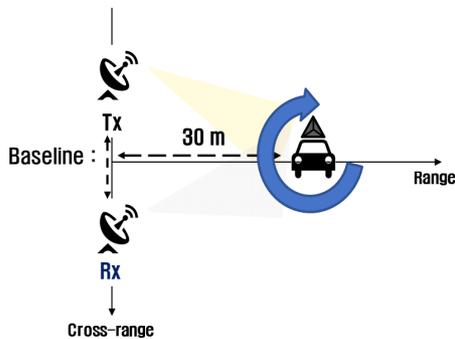


그림 9. 실험 기하구조  
Fig. 9. The geometry of the experiments.

표 1. 레이더 신호 사양  
Table 1. Specification of transmitted radar signal

Carrier frequency, $f_c$	76 GHz
Bandwidth, $B$	500 MHz
Pulse width, $T_p$	200 $\mu$ s
Pulse repetition frequency	1 KHz
Pulse repetition interval	200 $\mu$ s
Sampling frequency, $F_s$	10 MHz

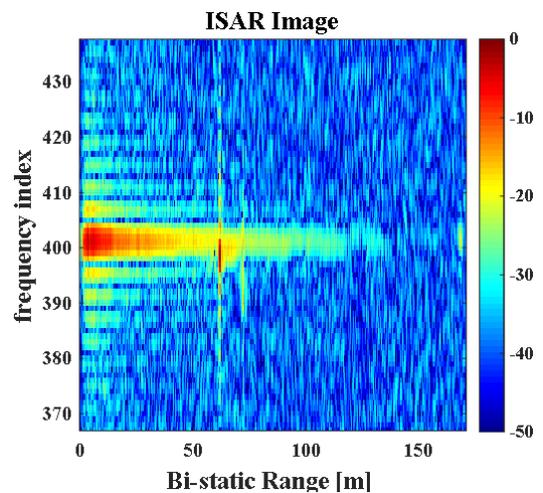


그림 10. 코너 리플렉터 ISAR 영상  
Fig. 10. ISAR image of the corner reflector.

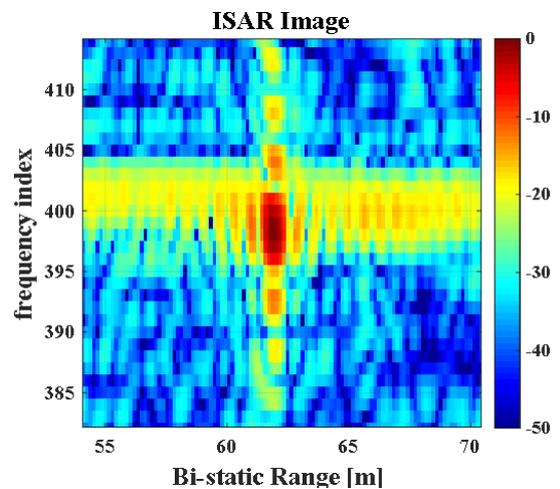


그림 11. 코너 리플렉터 확대 ISAR 영상  
Fig. 11. Extended ISAR image near the corner reflector.

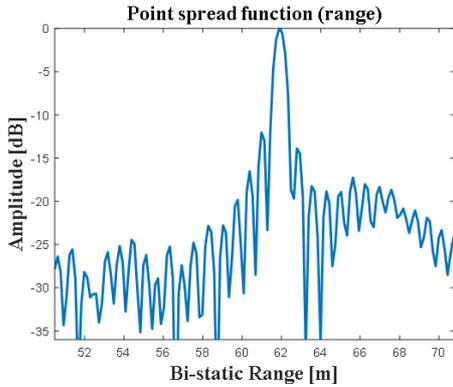


그림 12. 점 퍼짐 함수(거리)  
Fig. 12. Point spread function (range).

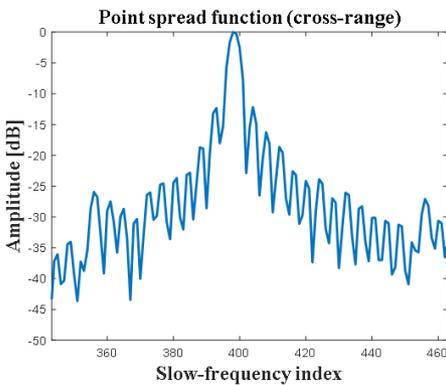


그림 13. 점 퍼짐 함수(수직-거리)  
Fig. 13. Point spread function (cross-range).

표 2. 점 표적 PSF 분석  
Table 2. PSF analysis of point target

	PSLR	ISLR
Range	-12.0411 [dB]	-6.0422 [dB]
Cross-range	-12.1746 [dB]	-7.7037 [dB]

본 연구에서 형성한 점 표적 ISAR 영상의 경우, 실측 환경임을 고려했을 때 압축이 제대로 수행되었음을 표 2를 통해 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 송신기와 수신기가 분리된 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템의 비동기 문제를 해결하기 위한 시스템 구성과 이를 통해 ISAR 영상을 획득한 결과를 제

시했다.

본 연구는 펄스 레이다와 달리 FMCW 레이다의 송신기와 수신기가 분리되었을 때 각 레이다의 동기가 달라서 발생하는 문제점을 sync 신호를 통해 해결했다는 점과 실제로 바이스테틱 FMCW ISAR 시스템을 구성함으로써 2차원 신호처리가 가능함을 확인해 그 유효성을 검증한 것에 의의가 있다. 따라서 본 연구는 향후 바이스테틱 FMCW 레이다가 필요한 환경에서 광범위하게 활용될 수 있을 것이다.

추후 레이다 칩의 SNR 향상 등을 통해 거리가 멀리 떨어진 바이스테틱 FMCW 레이다 시스템에서 발생하는 거리 오차를 해소하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

## References

- [1] G. M. Brooker, "Understanding millimetre wave FMCW radars," in *1st International Conference on Sensing Technology*, Palmerston North, Nov. 2005, pp. 1-6.
- [2] E. Giusti, M. Martorella, "Range Doppler and image autofocus for FMCW inverse synthetic aperture radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 2807-2823, Oct. 2011.
- [3] M. Jankiraman, *FMCW Radar Design*, Norwood, MA, Artech House, 2018.
- [4] C. Özdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2021.
- [5] V. C. Chen, M. Martorella, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms, and Applications*, Stevenage, SciTech, 2014.
- [6] M. S. Kang, J. H. Bae, B. S. Kang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using iterative processing via principal component analysis and bisection algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 15, pp. 3909-3918, Aug. 2016.
- [7] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, E. Yang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling via joint estimation of rotation center and velocity," *IEEE Transactions on*

- Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 2023-2029, Aug. 2016.
- [8] M. S. Kang, S. J. Lee, S. H. Lee, and K. T. Kim, "ISAR imaging of high-speed maneuvering target using gapped stepped-frequency waveform and compressive sensing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 10, pp. 5043-5056, Oct. 2017.
- [9] M. S. Kang, J. H. Bae, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Efficient ISAR autofocus via minimization of Tsallis entropy," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 6, pp. 2950-2960, Dec. 2016.
- [10] B. S. Kang, J. H. Bae, M. S. Kang, E. Yang, 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.
- [11] M. S. Kang, B. S. Kang, S. H. Lee, and K. T. Kim, "Bistatic-ISAR distortion correction and range and cross-range scaling," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5068-5078, Aug. 2017.
- [12] M. S. Kang, S. H. Lee, K. T. Kim, and J. H. Bae, "Bistatic ISAR imaging and scaling of highly maneuvering target with complex motion via compressive sensing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2809-2826, Dec. 2018.
- [13] K. M. Lee, I. S. Lee, H. S. Shin, J. W. Ok, J. H. Youn, and E. N. You, et al., "Signal modeling for bistatic FMCW radar asynchronization and its effect on ISAR images," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 3, pp. 218-231, Mar. 2023.
- [14] R. J. C. Middleton, "Dechirp-on-receive linearly frequency modulated radar as a matched-filter detector," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 2716-2718, Jul. 2012.
- [15] M. Weib, "Synchronisation of bistatic radar systems," in *2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, Anchorage, AK, Sep. 2004, pp. 1750-1753.
- [16] K. Lee, S. Bahrami, K. Kim, J. Kim, S. U. Choi, and H. J. Song, "Mono/multistatic mode-configurable E-band FMCW radar transceiver module for drone-borne synthetic aperture radar," in *2023 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC)*, San Diego, CA, Jun. 2023, pp. 237-240.

이 인 혁 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7112-1318>



2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 2021년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2021년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
 [주 관심분야] SAR/ISAR, 레이더 신호처리, 압축 센싱

리, 압축 센싱

조 민 곤 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4359-7324>



2022년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2024년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2024년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
 [주 관심분야] SAR/ISAR 및 레이더 신호처리

처리

김 현 동 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-8398-3868>



2023년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)  
2023년 3월~현재: 포항공과대학교 전자 전기공학과 석사과정  
[주 관심분야] SAR/ISAR 및 레이다 신호 처리

백 민 영 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6235-5806>



2016년 9월: 연세대학교 지구시스템학과 (이학사)  
2019년 2월: 연세대학교 지구시스템학과 (이학석사)  
2019년 4월~2023년 2월: (주)에스아이에이 연구원  
2023년 2월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] SAR, 딥러닝

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

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

옥 재 우 [LIG넥스원/수석연구원]

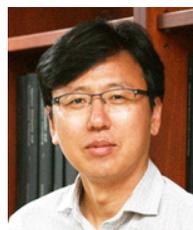
<https://orcid.org/0000-0002-6576-6467>



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

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: 레이다/IR 표적식별 특화연구실실장  
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장  
2019년 4월~현재: 차세대 영상레이다시스템 연구센터장  
2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장  
[주 관심분야] 레이다 신호 처리 및 영상, 레이다 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정