

바이스태틱 ISAR 영상 생성 시뮬레이션

Simulation of Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Image Generation

한 승 구 · 김 경 태 · 양 은 정*

Seung-Ku Han · Kyung-Tae Kim · Eun-Jung Yang*

요 약

본 논문은 송신 레이더와 수신 레이더의 위치가 서로 다른 바이스태틱 기하 구조에서의 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상 생성 기법에 대해 연구하였다. 모노스태틱 ISAR는 레이더의 LOS(Line of Sight) 방향으로 진행하는 표적에 대해 LOS의 수직 방향으로 충분한 해상도를 얻기 힘들고, 스텔스 표적의 탐지에도 적합하지 않다. 바이스태틱 ISAR는 이러한 모노스태틱 ISAR의 단점을 해결할 수 있다. 바이스태틱 기하 구조와 신호 모델링, 바이스태틱 도플러 등의 바이스태틱 ISAR 영상을 얻기 위한 과정을 소개하였다. 시뮬레이션을 통해 표적의 이동 시나리오에 따른 모노스태틱 ISAR 영상과 바이스태틱 ISAR 영상을 생성 후 각 시나리오마다 영상의 차이를 비교 분석하였다.

Abstract

This paper introduces a bistatic ISAR imaging technique. In bistatic geometry, the transmitter and receiver are placed in different locations. The monostatic ISAR is inadequate not only for obtaining images on targets approaching along the radar's line of sight, but also for stealth targets. In this paper, geometry, signal modeling as well as bistatic Doppler for bistatic ISAR are introduced to address these problems. Simulations results show bistatic ISAR images as well as monostatic ISAR images against target's moving scenarios, and analyze their differences for each scenario.

Key words: Bistatic ISAR Image, Bistatic Radar, Bistatic Doppler

I. 서 론

ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상은 레이더의 수신 신호를 이용하여 표적의 산란점의 위치와 크기를 2차원 평면에 나타낸 것이다. ISAR 영상을 분석하여 표적의 특징을 알 수 있기 때문에, 적 표적의 구분에 영상을 이용할 수 있어 군사적으로 중요한 역할을 담당한다. ISAR 영상은 일반적으로 모노스태틱 레이더를 이용하여

생성한다. 모노스태틱 레이더는 한 대의 레이더가 송신기와 수신기의 역할을 동시에 수행하며, 이를 이용한 ISAR 영상 생성 기술은 지난 수십년 동안 국내외에서 많은 연구가 진행되어 왔다^{[1]~[3]}.

그러나 모노스태틱 레이더를 이용한 ISAR 영상 생성은 두 가지 문제점을 가지고 있다. 첫째, 레이더의 LOS(Line of Sight) 방향으로 진행하는 표적에 대하여 LOS의 수직 방향(cross-range)으로 충분한 해상도를 가진 영상을

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 레이더/IR 표적식별 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

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

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 7, 2013 ; Revised February 5, 2014 ; Accepted February 10, 2014. (ID No. 20131007-089)

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

얻기 힘들다. 둘째, 스텔스(stealth) 기능을 탑재한 표적의 영상을 얻기 어렵다. 스텔스 표적의 구조상 레이더로부터 입사된 전자파를 입사된 방향과 다른 방향으로 반사시켜 표적의 RCS(Radar Cross Section) 값을 낮추게 되는데, 이 경우 모노스테틱 레이더로는 낮은 RCS 값 때문에, 표적이 충분히 근접하지 않는 한 반사신호가 잡음에 묻혀 영상을 얻기 어렵게 된다.

위에서 제시된 모노스테틱 레이더의 두 가지 문제점은 바이스테틱 레이더를 이용할 경우 모두 해결할 수 있다. 그림 1은 바이스테틱 레이더의 개념도이다. 바이스테틱 레이더는 송신기와 수신기가 분리되어 있기 때문에, 표적이 송,수신기 중 어느 한쪽의 LOS 방향으로 진행하더라도 cross-range 방향으로 충분한 해상도를 가지는 영상을 얻을 수 있다. 또한, 스텔스 표적의 구조상 송신 신호가 입사한 방향으로 반사되는 신호(back-scattering)의 크기는 작지만, 다른 방향으로 반사되는 신호의 크기는 상대적으로 크기 때문에, 바이스테틱 레이더를 이용하면 모노스테틱 레이더와 비교하여 스텔스 표적의 탐지가 용이하다.

이러한 모노스테틱 ISAR 영상의 단점을 보완하기 위해 바이스테틱 ISAR 영상은 2000년대 중반 이후 연구되기 시작하였다. 그러나 아직까지 모노스테틱 ISAR에 비해 많은 연구가 진행되어 있지는 않다. 현재 이루어지고 있는 바이스테틱 ISAR 연구 분야는 바이스테틱 신호 모델링^[4], 송신기와 수신기의 신호 동기화^[5], 바이스테틱 ISAR 영상 투과 평면^[6] 등이 있다.

본 논문에서는 표적 이동 시나리오에 따른 바이스테틱 ISAR 영상과 모노스테틱 ISAR 영상을 생성하고, 두 영상

의 차이점을 비교 분석하였다. II장에서는 바이스테틱 ISAR 영상을 얻기 위한 레이더 신호 모델링에 대해 설명하며, III장에서는 바이스테틱 영상 생성 기법에 대해 설명하고, IV장은 시뮬레이션 결과, V장은 결론을 나타낸다.

II. 바이스테틱 신호 모델링

그림 2는 바이스테틱 기하 구조이다. 두 개의 레이더는 서로 다른 위치에 있고, 한 개의 레이더는 송신기, 다른 레이더는 수신기를 담당한다. V 는 표적의 속도, β 는 두 개의 레이더와 표적 중심 사이의 각도로서, 바이스테틱 각도라고 부른다. δ 는 속도 벡터 V 와 β 의 이등분선과의 각도, R_1, R_2 은 각각의 레이더와 표적 중심까지의 거리이다.

레이더의 중심 주파수가 상대적으로 주파수 대역폭보다 큰 경우, 물리적인 전자파의 산란 과정을 점 산란점 모델로 근사화 시킬 수 있다는 사실이 알려져 있다^[7]. 따라서 ISAR 영상을 생성할 표적을 그림 3과 같이 점 산란원을 이용하여 모델링하였다.

레이더 송신 신호는 처프(chirp) 신호를 이용하였다. 처프 신호는 시간에 따라 주파수가 증가(up-chirp) 또는 감소(down-chirp)하는 신호이며, 짧은 펄스 폭에 광대역 신호를 담을 수 있어서 고해상도 영상 생성에 널리 사용되고 있다.

한 개의 레이더가 송신 신호를 보내고, 다른 한 개의 레이더가 N 개의 점 산란원으로 이루어진 표적에 반사된



그림 1. 바이스테틱 레이더 개념도
Fig. 1. Bistatic radar concept.

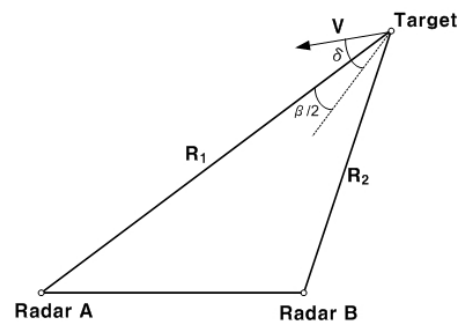


그림 2. 바이스테틱 기하 구조
Fig. 2. Bistatic geometry.

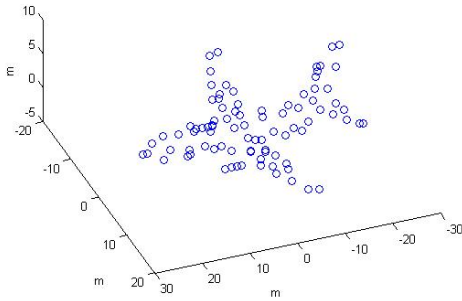


그림 3. 점 산란원 모델
Fig. 3. Scattering center model.

레이더 신호를 수신할 때 수신 신호는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(j2\pi[(f_0 + f_d)(t - (R_{1n} + R_{2n})/c) + \frac{B}{2\tau}(t - (R_{1n} + R_{2n})/c)^2]) \quad (1)$$

여기서 A_n 은 n 번째 산란원으로부터 산란되는 파의 세기, f_0 는 중심 주파수, B 는 주파수 대역폭, τ 는 펄스의 폭, R_{1n} 은 n 번째 산란원과 송신기와의 거리, R_{2n} 은 n 번째 산란원과 수신기와의 거리, c 는 빛의 속도를 나타낸다. f_d 는 바이스태틱 도플러 주파수 변화량이며, 식 (2)와 같이 정의한다^[8].

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{1}{\lambda} \left[\frac{d}{dt}(R_1 + R_2) \right] = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{dR_1}{dt} + \frac{dR_2}{dt} \right] \\ &= \frac{|V|}{\lambda} [\cos(\delta - \beta/2) + \cos(\delta + \beta/2)] \\ &= \frac{2|V|}{\lambda} \cos \delta \cos(\beta/2) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 λ 는 파장을 나타낸다. 바이스태틱 도플러 주파수 변화는 모노스태틱 도플러 주파수 변화량과는 다르게 표적과 레이더의 상대적인 속도뿐 아니라, 바이스태틱 각도에도 영향을 받는다.

III. 바이스태틱 ISAR 영상 생성

수신된 신호를 이용해 바이스태틱 ISAR 영상을 얻는 과정은 모노스태틱 ISAR 영상을 생성하는 기술을 그대로 적용할 수 있다. 그 과정은 다음과 같다.

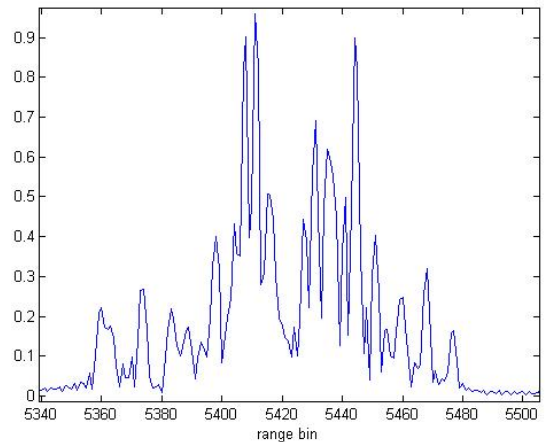


그림 4. 거리 측면도 예
Fig. 4. Range profile example.

표적으로부터 반사된 각각의 처프 신호를 정합 필터링(matched filtering)하여 거리 측면도(range profile)을 얻을 수 있다^[9]. 정합 필터링 과정을 거친 후 푸리에 변환을 하면 레이더 LOS 방향에 존재하는 산란원의 위치와 크기를 얻을 수 있다. 그림 4는 이렇게 얻은 거리 측면도의 예이다.

표적이 운동하면서 레이더의 PRF(Pulse Repetition Frequency)마다 위 그림과 같은 거리 측면도를 얻을 수 있다. 그림 5는 관측 시간 동안 얻은 거리 측면도를 cross-range 방향으로 중첩하여 나타낸 것이다. 그림의 가로 방향은 LOS 방향인 down-range이자 거리 측면도이고, 세로 방향은 LOS에 수직인 cross-range가 된다.

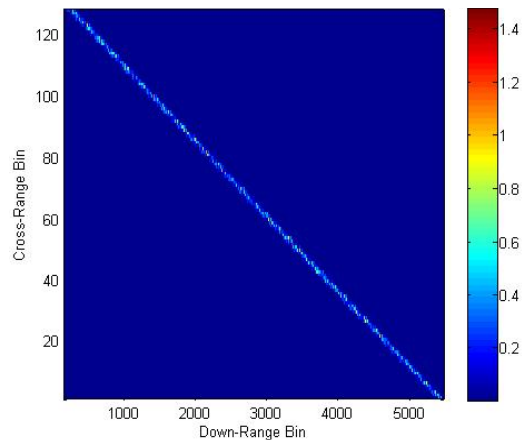


그림 5. 거리 측면도 중첩 예
Fig. 5. Range profile stack example.

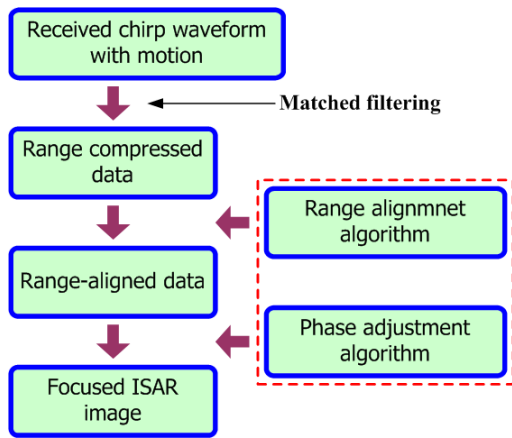


그림 6. ISAR 요동 보상 과정
Fig. 6. ISAR motion compensation procedure.

ISAR 영상 생성을 위해서는 표적과 레이더 간에 상대적인 움직임이 있어야 한다. 하지만 ISAR 영상을 생성하는 데 기여하는 표적의 움직임은 표적과 레이더 간의 상대적인 회전운동이고, 그 밖의 운동은 ISAR 영상의 초점을 흐리게 한다. 따라서 이러한 운동을 보상에 주어야 하며, 이것을 ISAR 자동 초점 기법(autofocus)이라고 부른다.

자동 초점 기법은 각 펄스별 거리 측면도를 정렬하는 거리 정렬 기법(range alignment)과 정렬 후 잔류 위상오차를 보상하는 위상보정 기법(phase adjustment)으로 나눈다. 바이스테틱 각도가 시간에 따라 크게 변하지 않는 일반

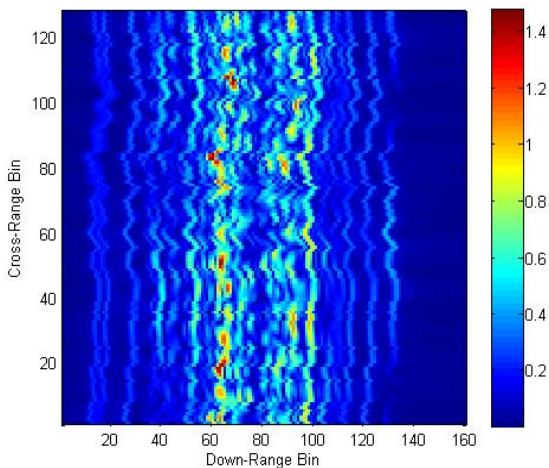


그림 7. 거리 정렬 기법 적용 후
Fig. 7. After applying range-alignment.

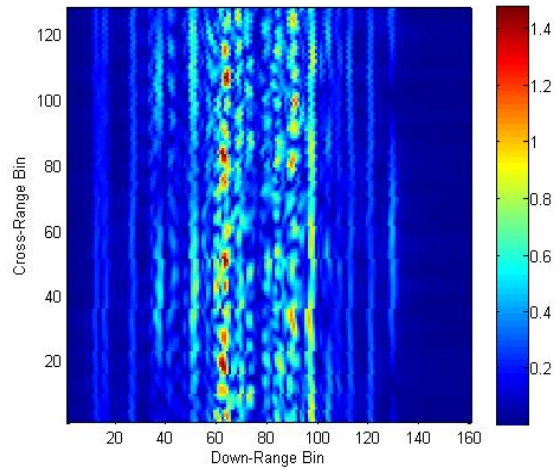


그림 8. 위상 보정 기법 적용 후
Fig. 8. After applying phase adjustment.

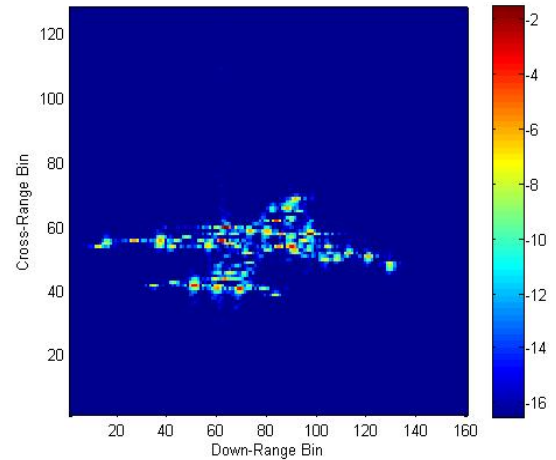


그림 9. 바이스테틱 ISAR 영상
Fig. 9. Bistatic ISAR image.

적인 표적 운동 시나리오에서는 모노스테틱 ISAR 영상 형성 기법에서 이용한 자동 초점 기법을 바이스테틱 ISAR 영상 형성에도 적용할 수 있다^[4]. 자동초점 기법은 많은 종류가 개발되었으며, 본 논문에서는 널리 쓰이는 기법인 엔트로피 최소화 기법을 사용하였다^[10].

그림 6는 ISAR 요동 보상 과정을 도식화 한 것이다. 그림 7은 그림 5에 거리 정렬 기법을 적용한 결과이고, 그림 8은 그림 7의 결과에 위상보정 기법을 적용한 결과이다. 이후 cross-range 방향으로 푸리에 변환을 하면 그림 9

와 같이 바이스태틱 ISAR 영상을 얻을 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 표적 이동 시나리오에 따른 모노스태틱 ISAR 영상과 바이스태틱 ISAR 영상을 생성하는 시뮬레이션을 수행한다. 표 1은 각 시뮬레이션마다 사용한 공통 변수들이다.

첫 번째 시뮬레이션은 표적의 운동이 모노스태틱 레이더의 LOS 방향으로 접근하는 경우이다. 시뮬레이션 기하 구조 및 조건은 그림 10과 같다.

시뮬레이션 결과는 그림 11과 같다. 모노스태틱 ISAR 영상의 경우, 표적의 운동 방향이 레이더의 LOS 방향과 일치하기 때문에 cross-range 방향의 해상도가 확보되지 않는 것을 볼 수 있다. 반면, 바이스태틱 ISAR 영상은 모노스태틱의 경우와 비교하여 상대적으로 cross-range 방향의 해상도를 확보하여 영상으로부터 비행기의 형상을 쉽게 파악할 수 있다. 다만 바이스태틱 기하 구조는 모노

표 1. 시뮬레이션 조건
Table 1. Simulation condition.

중심 주파수	9.1 GHz
대역폭	200 MHz
펄스폭	30 ms
펄스 수	128
표적의 속력	300 m/s
표적 비행 시간	10초

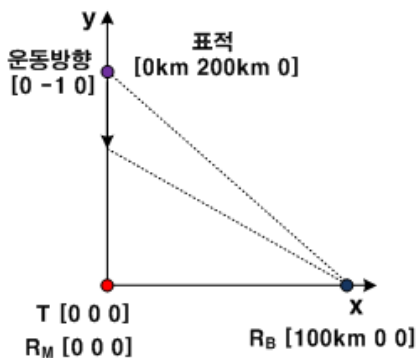


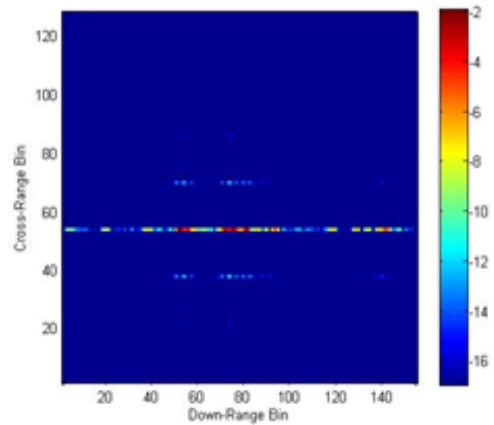
그림 10. 시뮬레이션 1 기하 구조
Fig. 10. Simulation 1 geometry.

표 2. 시뮬레이션 1 조건
Table 2. Simulation 1 condition.

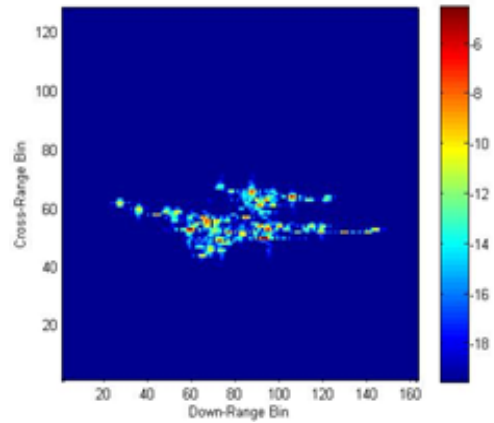
송신기 위치	[0 0 0]
수신기 위치	[0 0 0] (모노스태틱) [200 km 0 0] (바이스태틱)
표적 초기 위치	[0 200 km 1 km]
표적 운동 방향	[0 -1 0]

스태틱 기하 구조와 다르기 때문에 각 축의 해상도를 모노스태틱의 경우와 정량적으로 비교하기는 어렵다.

두 번째 시뮬레이션 기하 구조 및 조건은 그림 13, 표 3



(a) 모노스태틱 ISAR 영상
(a) Monostatic ISAR image



(b) 바이스태틱 ISAR 영상
(b) Bistatic ISAR image

그림 11. 시뮬레이션 1
Fig. 11. Simulation 1.

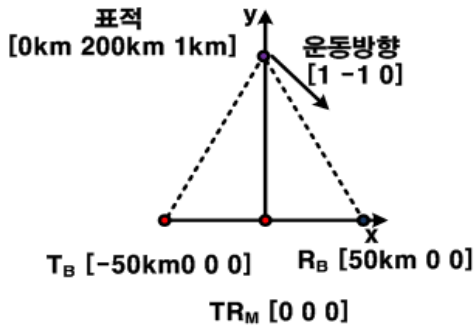


그림 12. 시뮬레이션 2 기하 구조

Fig. 12. Simulation 2 geometry.

표 3. 시뮬레이션 2 조건

Table 3. Simulation 2 condition.

송신기 위치	[0 0 0] (모노스테틱) [-50 km 0 0] (바이스테틱)
수신기 위치	[0 0 0] (모노스테틱) [50 km 0 0] (바이스테틱)
표적 초기 위치	[0 200 km 1 km]
표적 운동 방향	[1 -1 0]

과 같다.

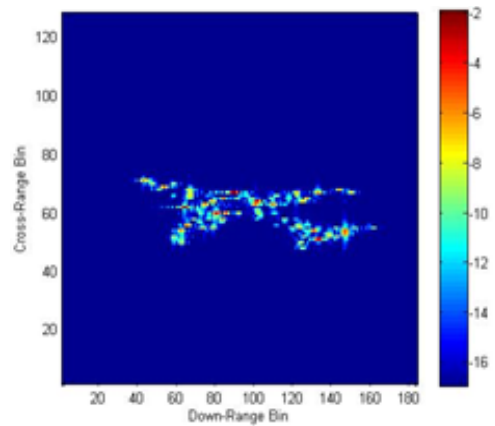
시뮬레이션 결과는 그림 13과 같다. 바이스테틱 레이더들은 모노스테틱 레이더를 중심으로 대칭 구조에 있지만, 영상의 결과는 차이가 있다. 이것은 영상 투과 평면 (image projection plane)이 각 기하 구조마다 서로 다르기 때문에 발생한다. 모노스테틱 ISAR 영상의 경우 영상 투과 평면이 수학적으로 정의되어 있지만, 바이스테틱 ISAR 영상의 경우 관련 연구가 현재 진행 중이다^[6].

세 번째 시뮬레이션의 기하 구조 및 조건은 그림 15와 같다. 기하 구조는 두 번째 시뮬레이션과 비슷하나, 표적의 초기 위치가 x축으로 이동하였다.

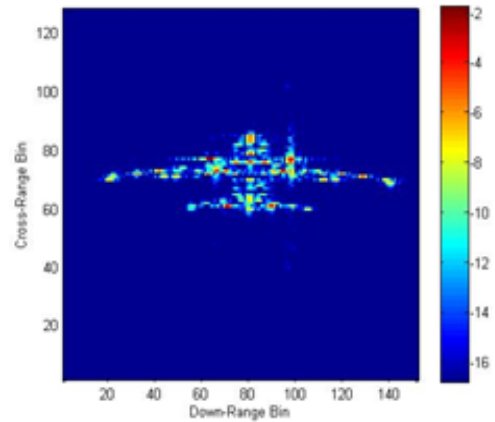
시뮬레이션 결과는 그림 15와 같다. 시뮬레이션 2와 비교하였을 때 모노스테틱 ISAR 영상의 경우는 cross-range 방향의 해상도만 약간 다를 뿐 전체적으로는 비슷하나, 바이스테틱 ISAR 영상의 경우는 시뮬레이션 2와 비교하였을 때 영상 투과 평면이 다를 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

기존 모노스테틱 ISAR 영상이 가지는 문제점을 보완



(a) 모노스테틱 ISAR 영상
(a) Monostatic ISAR image



(b) 바이스테틱 ISAR 영상
(b) Bistatic ISAR image

그림 13. 시뮬레이션 2

Fig. 13. Simulation 2.

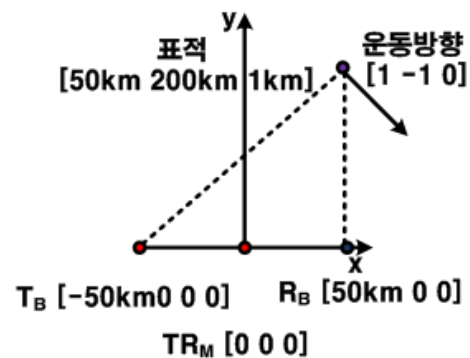


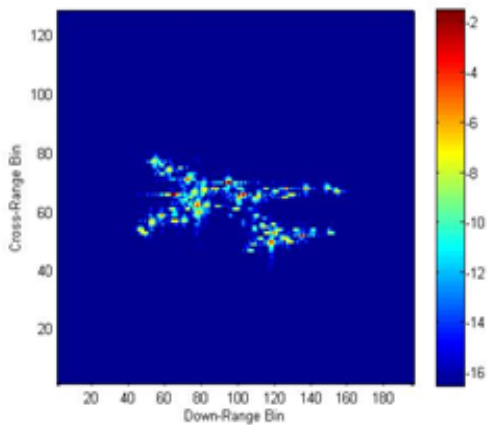
그림 14. 시뮬레이션 3 기하 구조

Fig. 14. Simulation 3 geometry.

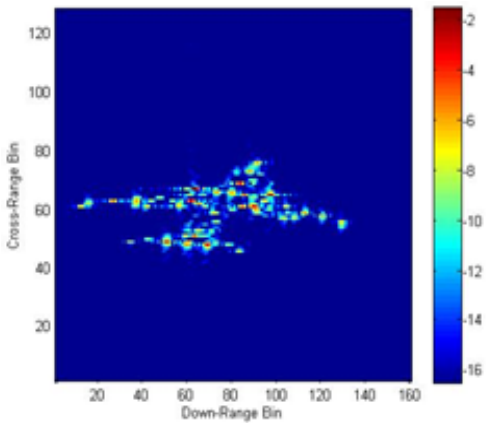
표 4. 시뮬레이션 3 조건

Table 4. Simulation 3 condition.

송신기 위치	[0 0 0] (모노스태틱) [-50 km 0 0] (바이스태틱)
수신기 위치	[0 0 0] (모노스태틱) [50 km 0 0] (바이스태틱)
표적 초기 위치	[50 km 200 km 1 km]
표적 운동 방향	[1 -1 0]



(a) 모노스태틱 ISAR 영상
(a) Monostatic ISAR image



(b) 바이스태틱 ISAR 영상
(b) Bistatic ISAR image

그림 15. 시뮬레이션 3
Fig. 15. Simulation 3.

할 수 있는 바이스태틱 ISAR 영상 생성 기법에 대해 연구하였다. 다양한 표적 이동 시나리오에서 모노스태틱

ISAR 영상과 바이스태틱 ISAR 영상을 생성한 후 비교 분석하였다. 바이스태틱 ISAR 영상은 송신기와 수신기가 떨어져 있는 기하 구조상 모노스태틱 기하 구조에서는 cross-range 방향으로 일정 해상도를 확보할 수 없는 경우에도 영상을 확보할 수 있고 시뮬레이션을 통해 이를 확인할 수 있었다. 또한, 바이스태틱 레이더는 모노스태틱 레이더와 비교하여 상대적으로 스텔스 표적에 대한 탐지가 유리하다고 알려져 있다. 그러나 이를 검증하기 위해서는 표적을 점 표적으로 모델링하지 않고, CAD 데이터를 기반으로 하여 전자파 수치해석을 통해 바이스태틱 산란 매커니즘을 연구해야 한다. 이것은 향후 연구 주제로 남아있다.

References

- [1] F. Berizzi, "ISAR imaging of targets at low elevation angles", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no 2, Apr. 2001.
- [2] Zhishun She, Y. Liu, "Autofocus for ISAR imaging using higher order statistics", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 5, no. 2, Apr. 2008.
- [3] G. Zweig, "Super-resolution Fourier transforms by optimisation, and ISAR imaging", *IEE Proceeding Radar, Sonar and Navigation*, vol. 150, no. 4, Aug. 2003.
- [4] M. Martorella, J. Palmer, J. Homer, B. Littleton, and L. D. Longstaff, "On bistatic inverse synthetic aperture radar", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no 3, pp. 1125-1134, Jul. 2007.
- [5] M. Martorella, "Analysis of the robustness of bistatic inverse synthetic aperture radar in the presence of phase synchronisation errors", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no 4, Oct. 2011
- [6] Changzheng Ma, T. -S. Yeo, Q. -G. Guo, and P. Wei, "Bistatic ISAR imaging incorporating interferometric 3-D imaging technique", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 10, Oct. 2012.
- [7] L. C. Potter, D. -M. Chiang, R. Carriere, and Michael J. Gerry, "GTD-based parametric model for radar scatter-

ring", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 10, Oct. 1995.
[8] Nicholas J. Willis, *Bistatic Radar*, Artech House, 1991.
[9] Bassem R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, Chapman & Hall/Crc, 2000.

[10] Xi Li, Guosui Liu, and Jinlin 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.

한 승 구



2007년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 통합 박사과정
[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석

양 은 정



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2006년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2011년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2011년 1월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 신호처리, ISAR 이동 보상

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정