

LPI/ECCM 환경에서의 ISAR 파형 설계 및 시뮬레이터 운용

손인혜*¹, 윤상호*², 김기완*³

A ISAR Waveform Design and Simulator Operation in an LPI/ECCM Environment

In-Hye Son*¹, Sang-Ho Yoon*², and Ki-Wan Kim*³

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(912938101)

요 약

ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar)는 주야간 및 날씨에 독립적이며, 비협조적 자가-회전운동을 하는 표적에 대하여 2차원 영상을 생성하는 레이더로 비행 표적 또는 해상 이동표적 탐지에 주로 사용된다. 본 논문에서는 ESM(Electronic Support Measure) 혹은 인터셉터에 노출을 최소화하는 저피탐 기능 및 전파교란책의 방해에도 정상 임무를 수행할 수 있는 전파교란대응책 기능을 가지는 시뮬레이터를 제안한다. 시뮬레이터는 임무 환경에 대한 변수 및 표적정보 등을 입력받아 저피탐 또는 전파교란대응책 모드에 맞는 파형 설계 수행 및 해당 파형으로 수신 신호를 생성하고, 입력된 허위 표적정보를 기반으로 재밍 신호를 모의한다. 저피탐 모드에서는 원시신호에 레이더 송신신호만을 포함하고, 전파교란대응책 모드에서는 재밍 신호 또한 포함된다. 각 모드 원시신호를 생성한 후, 해당 신호의 신호처리를 통한 ISAR 영상을 생성하는 기능을 가진다.

Abstract

Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) is a radar system capable of generating 2D images of non-cooperative motion, independent of day, night or weather conditions, and is primarily used for detecting airborne or maritime moving targets. In this paper, we propose a simulator with Low Probability Intercept(LPI) functionality, which minimizes exposure to Electronic Support Measure(ESM) or interceptors, and Electronic Counter-Counter Measure(ECCM) functionality, which allows the system to perform its mission normally even in the presence of jamming signals. The simulator takes input such as mission environment variables and target information to design a waveform suitable for LPI or ECCM modes, and generates a jamming signal based on the input about false target information. In LPI mode, the raw signal includes only the radar transmission signal, while in ECCM mode, the jamming signal is also included. After generating the raw signal, the simulator processes these signals to generate ISAR image.

Keywords

ISAR, inverse synthetic aperture radar, LPI, ECCM, jamming, image processing

* 국방과학연구소 레이더전자전기술센터(*³ 교신저자)

- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0002-7451-6398>

- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-5557-6582>

- ORCID³: <http://orcid.org/0000-0002-7918-8098>

· Received: Oct. 28, 2024, Revised: Nov. 14, 2024, Accepted: Nov. 17, 2024

· Corresponding Author: Ki-Wan Kim,

Radar & EW Technology Center, ADD, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, Korea

Tel.: +82-42-821-4894, Email: kiwankim@add.re.kr

I. 서 론

정지된 표적에 대해 비행체가 이동하여 가상 조리개를 형성하여 고해상 영상을 얻는 SAR(Synthetic Aperture Radar)[1]와는 반대로 ISAR는 비협조적 자가-회전운동을 하는 표적에 의한 회전운동을 통해 2차원 영상을 얻을 수 있다[2]. SAR는 방위 방향 해상도를 파라미터 설계를 통해 설정할 수 있지만, ISAR는 표적의 회전운동 및 SAT(Synthetic Aperture Time) 설정에 따라 방위 방향 해상도는 바뀐다.

ISAR는 공중표적 또는 해양 표적탐지를 위해 사용되며 ISAR의 영상은 표적 식별에 소스가 된다.

표적의 위치정보를 기반으로 신호처리를 수행하는 SAR와 다르게, ISAR는 표적의 이동 성분 및 회전성분도 알 수 없기 때문에, 신호 기반 영상처리 기법들이 적용된다. ISAR의 신호처리 기법으로는 ARP(Average Range Profile)의 엔트로피 또는 대조비(Contrast) 값 기반으로 병진운동을 보상하는 TMC(Translation Motion Compensation)[3][4], TMC 후의 잔여 위상을 보상하는 MCPA(Maximum Contrast Phase Adjustment)[5], CPI(Coherent Processing Interval) 동안 표적의 거리방향 전체 변위가 거리 해상도 보다 커져서 산란원의 거리방향 위치가 시간에 따라 변하는 RCM(Range Cell Migration)을 보상하기 위한 Keystone 변환[6] 등이 대표적이다.

항공용 ISAR 운용 시, 인터셉터(Interceptor)로의 비행체 위치 노출이나 ECM(Electronic Counter Measure)에서의 재밍 신호로 인한 영상 품질이 저하되는 경우가 있다. 인터셉터 및 ECM 재밍 신호 회피 방법으로는 기본적으로 저피탐(LPI, Low Probability Intercept) 또는 전파교란대응책(ECCM, Electronic Counter-Counter Measure) 파형을 사용하는 것이다. LPI 파형으로는 PSK(Phase Shift Keying), FSK(Frequency Shift Keying)[7] 등이 알려져 있으면 ECCM 파형으로는 파형 간 직교성을 가지는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)[8], APCN(Advanced Pulse Compression Noise)[9] 등이 있다. 주로 이 파형들은 SAR에서 LPI 및 ECCM을 위해 사용되며 ISAR에서는 적용하는 사례가 드물다.

ISAR에 대한 ECM 방식으로는 잡음 신호를 기반으로 하는 RF(Radio Frequency) 잡음 간섭, FM(Frequency Modulation) 잡음 간섭[10] 및 인터셉트 신호를 기반으로 허위표적 정보를 송신하는 방법이 있다[11]. 이중 가장 효과적인 방법으로는 DRFM(Digital Radio Frequency Memory)을 이용해 레이다 송신신호의 복제를 통한 재밍 방식으로 낮은 파워로 큰 재밍 효과를 가져올 수 있다.

ECM 재밍에 대한 회피를 위해 chirp 파형의 기울기를 변경하며 송신하는 방법[12], RSF(Randomized Stepped Frequency)를 적용하는 방법[13] 등이 있다. 본 논문의 시뮬레이터에서는 재머가 ISAR로부터 수신한 펄스 신호를 기반으로 DRFM을 통해 만들어지는 재밍 신호는 ISAR 다음 펄스 수신 타이밍에 송신된다는 가정하에 펄스 간 직교성을 이용한 ECCM 방식을 적용한다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장은 LPI/ECCM 모드에서의 파형 설계를 다룬다. LPI 모드에서 PRF(Pulse Repetition Frequency), 듀티비(Duty cycle), 도플러, 파형 변조 및 ECCM 모드에서 파형 설정 방법을 기술한다. 3장에서는 수신신호 생성에 관련하여 다루고 있으며, LPI 모드에서의 원시신호 및 ECCM 모드에서 재밍 모델 계산을 통한 재밍 신호 생성에 대해 살펴본다. 4장에서는 ISAR 신호처리에 대한 전반적인 내용을 다룬다. 병진운동 보상, 잔여 위상 보상 및 RCMC(Range Cell Migration Compensation) 세 단계를 통해 ISAR 영상을 형성한다. 5장에서는 시뮬레이터의 구성 및 시뮬레이션 결과를 확인하고, 6장에서는 결론에 대해 기술한다.

II. 파형 설계

본 시뮬레이터는 임무 모드, 파형 조건, HW 조건, 표적정보 등의 입력된 정보를 바탕으로 임무 시나리오 생성 및 파형 설계를 수행하고, 이를 기반으로 ISAR 원시신호 생성 및 신호처리 과정으로 시뮬레이션이 진행된다.

파형 설계는 LPI 및 ECCM 모드에 따라 다르게 진행된다.

2.1 LPI 모드 파형 설계

LPI 모드 파형 설계 시 적 탐지기에 노출되지 않기 위한 저 전력, 평균 전력 확보를 위한 높은 듀티비, 변조 기법 노출 방지를 위한 다양한 변조 기법을 고려하여야 한다. 이 조건들을 고려한 PRF 및 듀티비, 최대 송신 전력 설계 방안은 아래와 같다.

PRF는 두 조건의 최소 PRF 및 한 조건의 최대 PRF를 만족하는 범위 안에서 설계하여야 한다.

첫 번째 최소 PRF 조건은 표적 회전운동에 의한 도플러 대역폭 만족을 위한 PRF[2]로, 방위 방향 ISAR 영상은 표적의 회전운동에 의한 도플러 이동에 의해 생성되기 때문에, PRF는 표적 회전운동 주기 동안의 도플러 이동 대역폭을 다 포함할 수 있게 선정되어야 한다. 롤(Roll)과 피치(Pitch) 운동 각은 식 (1)과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned}\phi_r &= \theta_{r,\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T_r}t\right), \\ \phi_p &= \theta_{p,\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T_p}t\right)\end{aligned}\quad (1)$$

이때, $\theta_{r,\max}$ 는 최대 롤 각도 T_r 은 롤 주기, $\theta_{p,\max}$ 는 최대 피치 각도, T_p 은 피치 주기이다. 일반적으로 ISAR 영상에서 낮은 입사각일 때, 선박의 제일 높은 부분이 가장 큰 시선속도의 도플러 변이 값을 가진다. 롤과 피치 운동으로 인한 최대 관찰 도플러는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}f_{d,r,\max} &= \frac{4\pi h\theta_{r,\max}}{\lambda T_p}, \\ f_{d,p,\max} &= \frac{4\pi h\theta_{p,\max}}{\lambda T_p}\end{aligned}\quad (2)$$

이때, h 는 선박의 가장 높은 부분이다. 전형적인 mono-hull 선박에서 피치 주기가 롤 주기의 1/3에서 2/3배로 짧지만, 최대 롤 각도가 최대 피치 각도의 3배 이상 크기 때문에 최대 관찰 도플러는 롤 운동으로 인해 발생한다. 순시 도플러 변이는 최대 각도 값 안에서 양수와 음수로 반복되기 때문에 식 (3)과 같이 첫 번째 최소 PRF 조건은 최대 도플러 오프셋의

두 배가 되어야 한다.

$$PRF_{\min1} = 2f_{d,r,\max}\quad (3)$$

두 번째 최소 PRF 조건은 방위 방향 AMBR(Ambiguity Ratio) 만족을 위한 PRF로, 방위 방향으로 비행체 속도 및 빔 퍼짐현상으로 인한 도플러 aliasing을 피하기 위한 PRF는 식 (4)와 같다[14].

$$PRF_{\min2} \geq \frac{4v_p}{\lambda} \sin\frac{\beta_{un}}{2} \sin\beta_{sc}\quad (4)$$

이때, v_p 는 비행체 속도, β_{sc} cone angle, β_{un} 은 방위 방향으로 AMBR을 만족하기 위한 unambiguous angle이다.

식 (3)과 식 (4)를 통해 계산된 두 조건의 최소 PRF 중 작은 값을 PRF_{\min_final} 로 선정하며, 이 과정은 식 (5)와 같다.

$$PRF_{\min_final} = \min(PR_{\min1}, PRF_{\min2})\quad (5)$$

최대 PRF 조건은 Received eclipse 만족을 위한 PRF[15]로, 다음 펄스를 송신하기 전 원하는 영상폭 영역의 데이터 획득을 위해서는 PRI는 아래 식 (6)을 만족하여야 한다.

$$PRI \geq T_p + \frac{2}{c} \left(R_{sc} + \frac{R_{sw}}{2} \right)\quad (6)$$

이때 $T_p = \eta PRI$ 는 펄스폭, η 는 듀티비, c 는 빛의 속도, R_{sc} 는 영상 중심까지의 경사 거리, R_{sw} 는 영상폭 크기이다. 식 (6)에 $T_p = \eta PRI$ 를 대입하여 PRF에 대한 식으로 정리하면 아래와 같다.

$$PRF_{\max} \leq \frac{c(1-\eta)}{2R_{sc} + R_{sw}}\quad (7)$$

최종 PRF는 위 과정에서 계산된 PRF 만족 구간에서 최솟값을 최종 PRF로 선정한다.

듀티비는 Receive eclipse 조건과 Transmit eclipse 조건을 만족하는 선에서 최댓값을 찾아야 한다.

Receive eclipse 조건인 식 (7)을 듀티비에 대해 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\eta \leq 1 - \frac{(2R_{sc} + R_{sw})PRF}{c} \quad (8)$$

Transmit eclipse 조건에서 유도된 듀티비 값은 식 (9)와 같다[15].

$$\eta \leq \frac{(2R_{sc} - R_{sw})}{c} PRF \quad (9)$$

위 식 (8)과 식 (9)를 통해 최대 듀티비를 계산할 수 있다.

최대 듀티비 값으로 계산된 PRF값이 식 (5)를 만족하는 최소 PRF보다 작을 경우, 해당 구간에서는 식 (5)의 결과값으로 최대 듀티비를 재계산하여야 한다.

최대 송신 전력은 시스템에서 설정된 NESZ(Noise Equivalent Sigma Zero) 설계 기준을 만족하는 최소값으로 설정된다. NESZ 계산 시 평균 송신출력은 $P_{avg} = P_T \eta$ 이고, P_T 는 최대 송신 전력이다. 앞서 계산된 듀티비 값을 대입하여 NESZ식을 P_T 에 대한 식으로 정리하면 식 (10)과 같다[2].

$$P_T = 64\pi^3 k_B T_0 \left(\frac{R_{sc}^4}{T_{CPI} \sigma_N} \right) \left(\frac{F_N}{\eta G_T} \right) (L_r L_a) \cdot \left(\frac{L_{radar} L_{atmos}}{G_R \lambda^2} \right) \quad (10)$$

여기서 k_B 는 볼츠만상수, T_0 는 기준잡음온도, R_{sc} 는 영상 중심까지의 경사 거리, T_{CPI} 는 동기화 프로세싱 구간, σ_N 는 NESZ 설계값, F_N 은 시스템 잡음 지수, G_T , G_R 은 송수신 안테나 이득, L_{radar} 는 전파 송신 손실, L_{atmos} 는 대기 손실, L_r 는 비이상적 거리 필터링 SNR 손실, L_a 는 비이상적 도플러 필터링 SNR 손실이다.

P_T 값이 정해지면 시스템에서 회피 가능한 수신 인터셉터의 민감도 계산이 가능하다. 수신 인터셉터의 민감도는 아래의 식 (11)과 같다[17].

$$S_I = \frac{P_I}{G_I} = \frac{P_T G_T G_{TS} \lambda^2 L_I}{(4\pi)^2 R_I^2} \quad (11)$$

여기서 P_T , G_T 및 P_I , G_I 는 각각 송신 레이다와 인터셉터의 출력과 이득을 나타내고 L_I 는 인터셉터의 수신 손실, R_I 는 레이다와 인터셉터의 거리, G_{TS} 는 부엽 이득을 나타내고, 주엽 신호를 수신한 경우 $G_{TS} = 1$ 이다.

PRF, 듀티비 등의 설계가 완료되면 LPI 변조 기법을 선택하여 해당 파라미터들로 파형설계 결과를 송신한다. LPI 변조 기법은 크게 PSK와 FSK 두 가지로 나뉜다. PSK에는 이진법 형태의 Barker code, Polyphase 형태의 Polyphase Barker, Frank, P1~P4 code, Polytime 형태의 T1~T4 code가 있다. FSK에는 Costas code가 있다[7].

2.2 ECCM 모드 파형 설계

ECCM 모드 파형 설계 시 PRF는 LPI 파형 설계의 PRF 계산 과정과 똑같이 진행되지만, 최대 송신 전력 및 듀티비는 하드웨어 설계 시 고정된 값으로 선정한다.

PRF 설계가 완료되면 ECCM 변조 기법을 선택하여 해당 파라미터들로 파형 설계 결과를 송신한다. ECCM 모드에서는 ECM에서의 재밍 신호는 ISAR로 다음 펄스에 수신된다는 가정하에 송신 펄스 간 직교성을 유지할 수 있는 펄스 다양성 기법을 적용하여 정합필터에서 재밍 신호에 대한 이득을 최소화함으로써 최종 ISAR 영상에서 재밍 신호에 대한 영향을 제거하고자 한다. ECCM 파형에는 OFDM, APCN, Noise를 선택할 수 있다.

III. 수신신호 생성

LPI 모드에서는 빔 폭 내의 자가 회전운동을 하는 표적에 대한 정보만이 수신되지만, ECCM 모드에서는 재밍 신호도 함께 수신된다.

3.1 표적 수신 신호

ISAR 영상은 회전 표적에 대한 영상 형상으로

이때, $R_{ECM}(t)$ 은 ECM과 비행체 임무 중심점과의 거리이다. 그림 2와 같이 송신 재밍 신호는 DRFM에서 현재 펄스 시간에 해당하는 플랫폼과 재머 간의 상대적 기동에 따른 전파 시간 지연을 계산하여 식 (14)의 신호 복제본과 재밍 모델의 convolution을 통해 만들어지는 것을 가정한다.

n^{th} 펄스에 대한 ECM으로부터 재밍 수신 신호는 식 (15)와 같다.

$$s_{ECM}(n, t') = z(n, t') \cdot \exp\left(j2\pi f_c \left(t' - \frac{\hat{R}_{ECM}(t)}{c}\right)\right) \quad (15)$$

이때, $\hat{R}_{ECM}(t) = R_{ECM}(t) + r_{FT}(t)$, $r_{FT}(t)$ 는 허

위표적의 회전운동 모델링으로 생기는 거리 지연 성분이다. ISAR의 경우 재밍 신호가 ISAR 영상에 나타나기 위해서는 허위표적 회전운동도 모델링되어야 한다. 기저대역 재밍 신호 $z(n, t)$ 는 식 (16)과 같이 정의한다.

$$z(n, t) = x\left(n-1, t - \frac{\hat{R}_{ECM}(t)}{c}\right) \otimes v_{ECM}(n, t) \quad (16)$$

이때, $v_{ECM}(n, t)$ 는 재밍 모델이다.

재밍 신호 모델은 MCDJ(Multiple Constant Delay Jamming), NCJ(Noise Convolution Jamming), ICJ(Image Convolution Jamming), FTJ(False Target Jamming)등 4가지로 구성된다.

MCDJ 모델은 허위 점 표적의 수와 표적 사이의 거리를 정한 후 일정한 지연을 적용하여 재밍 신호를 생성하는 방법으로 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{ECM}(n, f) = \sum_{n_f} \exp\left(-j2\pi f \frac{t_{MCDJ}}{\sqrt{N_f}}\right) \quad (17)$$

이때, N_f 는 재밍 점 표적 수, t_{MCDJ} 는 MCDJ 모델의 재밍 신호 시간 지연을 의미하며 식 (18)과 같다.

$$t_{MCDJ} = \frac{2}{c} \left(R_{MCDJ} + w_{MCDJ} \left(-\frac{1}{2} + \frac{n_f}{N_f} \right) \right) \quad (18)$$

위 식에서 R_{MCDJ} 은 재밍 점 표적 위치와 ECM 사이의 거리방향 거리, w_{MCDJ} 은 재밍 점 표적 중 첫 표적과 마지막 점 표적 사이 폭이다.

NCJ는 거리방향으로 barrage 재밍을 하는 방법으로 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$v_{ECM}(n, f) = FFT2\left(\text{rect}\left(\frac{t-t_{NCJ}}{T_{NCJ}}\right)\mu(n, t)\right) \quad (19)$$

이때, t_{NCJ} 는 ECM에서 재밍 blanket까지의 거리방향으로의 지연, T_{NCJ} 는 거리방향으로 재밍 영역의 시간 폭, $\mu(n, t)$ 는 임의의 분포를 가지는 노이즈 신호이다.

ICJ는 특정 모양의 이미지를 재밍 신호로 만드는 방법으로 식 (20)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{ECM}(n, f) = FFT2\left(A(t-t_{ICJ})\mu(n, t)\right) \quad (20)$$

이때, $A(t-t_{ICJ})$ 는 임의의 분포를 가지는 노이즈 신호 $\mu(n, t)$ 를 특정 이미지 영역 안에서만 값을 가지도록 설정한다.

FTJ는 특정 표적을 ISAR 영상 안 임의의 위치에 만드는 재밍 방법으로, 이때 $z(n, t)$ 의 $r_{FT}(t)$ 항목은 0으로 설정한다. FTJ 재밍모델은 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{ECM}(n, f) = \sum_k \alpha_{k, FTJ} \exp\left(-j2\pi f \left(\frac{2R_{k, FTJ}(t)}{c}\right)\right) \quad (21)$$

이때, $\alpha_{k, FTJ}$ 는 허위표적의 k 번째 산란원 반사 크기이고, $R_{k, FTJ}(t) = R_{ECM}(t) + r_{k, FTJ}(t)$, $r_{k, FTJ}(t)$ 은 허위표적의 회전운동에 의한 k 번째 산란원의 거리 지연 성분이다.

IV. ISAR 신호 처리

4.1 펄스압축 및 윈도잉

원신호는 해상 표적의 초기 예상 위치를 기준

으로 최소 영상 폭을 만족하도록 수신된 신호이고, 기준신호는 레이더의 송신신호이다.

기준신호는 식 (22)와 같고, LPI 경우 기준신호가 모든 펄스마다 같지만, ECCM의 경우 펄스별 송신 신호에 따라 달라진다.

$$h(n, t') = x\left(n, t' - \frac{2}{c}r_o(t)\right) \exp(j2\pi f_c t) \quad (22)$$

이때, r_o 는 비행체 임무 중심점과 ISAR 영상 중심 점과의 거리이다.

원시신호의 FFT 값과 기준신호의 FFT에 conjugation을 취한 값을 곱한 후 IFFT를 통해 거리 방향으로 압축된 신호를 획득할 수 있다.

수식으로 표현하면 식 (23)과 같다.

$$\tilde{y}_m(t') = IFFT(Y_m(f)H_{ref}^*(f)) \quad (23)$$

$Y_m(f)$ 는 수신 신호로, LPI 모드일 경우 실제 표 적에 대한 신호만을 포함하여 수식 (12)와 동일 하지만, ECCM 모드일 경우 3.2절의 재밍 신호도 포함한다.

4.2 병진운동 보상

표적의 거리 변화 성분 중 식 (13)에서 $R(t)$ 성분으로 인한 표적의 병진운동으로, 동일 점 산란원에 서 반사된 신호는 펄스마다 다른 거리 bin에 위치하게 된다. 펄스별로 다른 시간 지연으로 들어온 신호를 같은 거리 bin에 정렬하는 것이 병진운동 보상이 다[3].

각 펄스 range profile shift 값을 $\Delta_r = [\Delta_r(0), \Delta_r(1), \dots, \Delta_r(N-1)]$ 이라고 할 때, 거리 압축이 끝난 수신 신호 envelop $p(r, n)$ 들의 모든 펄스에 대한 합 $p_{ave}(r, \Delta_r)$ 을 FT에서의 시간 변이로 표현하면 식 (24)와 같다.

$$p_{ave}(r, \Delta_r) = \sum_{n=0}^{N-1} p(r + \Delta_r(n), n) \quad (24)$$

이때, N 은 전체 펄스 수이다.

거리방향 압축 신호의 엔트로피를 최소화하는 방법으로 거리 정렬을 수행한다. 상숫값을 제외한 식 (24)의 엔트로피는 식 (25)와 같다.

$$E'(\Delta_r) = - \int_r p_{ave}(r, \Delta_r) \ln p_{ave}(r, \Delta_r) dr \quad (25)$$

거리 정렬이 잘 수행될수록 엔트로피값은 줄어들기 때문에, $E'(\Delta_r)$ 을 최소화하는 방향으로 펄스별 거리 변이를 적용하여 최적화된 거리 정렬을 수행한다. 이러한 Δ_r 을 구하기 위해서 식 (25)를 미분하여 정류점(Stationary point)를 찾는다. 업데이트된 Δ_r 로 새로운 $p_{ave}(r)$ 을 구한 다음 엔트로피가 감소하지 않을 때까지 이 과정을 반복한다.

4.3 잔여 위상 오차 보상

거리 정렬 후 남아있는 도플러 위상 부분을 보상하지 않으면 FFT를 통해 영상을 형성하였을 때, 영상의 초점이 맞지 않는 현상이 발생한다. 이를 보상하는 단계를 잔여 위상 오차 보상이라고 하며 영상의 성능 기준치로 대조비를 적용한다[5].

병진운동 보상 단계 후의 신호를 $\tilde{p}(r, n)$ 이라고 할 때, 잔여 위상 오차 보상을 수행한 ISAR 영상 식 (26)과 같다.

$$\tilde{P}(r, k) = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{p}(r, n) \exp[j\phi(n)] \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}kn\right) \quad (26)$$

이때, n 은 펄스, r 은 거리 bin, k 는 도플러 주파수, $\phi(m)$ 은 adjustment phase를 나타낸다.

상수항을 제외한 $|\tilde{P}(r, k)|^2$ 의 대조비는 식 (27)과 같다.

$$c' [|\tilde{P}(r, k)|^2] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{P}(r, k)|^4 \quad (27)$$

분포가 고르게 되어 있는 분포 함수일수록 작은 대조비 값을 가지기 때문에 초점이 잘 맞춰진 ISAR 영상일수록 변화가 급격한 분포 함수를 가지므로 대조비 값은 크다.

식 (27)의 미분을 통해 정류점인 $\phi(m)$ 을 계산할 수 있다. 최적화된 $\phi(m)$ 을 구하기 위해서 초기 임의의 $\phi(m)$ 값을 두고 $\tilde{P}(r,k)$ 를 계산한 다음 $\phi(m)$ 값을 갱신한다.

이 과정을 식 (28)과 같이 이전 단계의 위상과 현재 단계의 위상의 차가 μ 안에 들어올 때까지 반복한다.

$$\max_{m=0}^{M-1} \exp | [j\phi_i(m)] - \exp [j\phi_{i-1}(m)] | \leq \mu \quad (28)$$

4.4 Keystone 변환

식 (13)에서 $y_k\theta(t)$ 성분은 표적의 비 균일 회전 운동 $\theta(t)$ 에 의한 표적의 거리방향 이동 성분을 나타낸다. 이때, CPI 동안 $y_k\theta(t)$ 의 전체 변위가 거리 해상도 보다 커진다면 산란원의 거리방향 위치가 시간에 따라 변하는 RCM(Range Cell Migration) 현상이 발생한다. 즉 RCM 현상이 발생하지 않기 위해서는 CPI 동안 $y_k\theta(t)$ 의 전체 변위가 거리 해상도 보다 작아야 한다[6].

그러나 고 기동 표적, 해상 표적과 같이 자가-회전운동을 겪는 표적의 경우, 상기 수식을 만족하지 않는 경우가 많다. 따라서 자가-회전운동을 겪는 표적에 대하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해서는 RCMC를 통한 RCM 현상을 추가로 보상해야 한다.

잔영 위상 보상까지 수행된 신호는 식 (29)와 같다.

$$\tilde{P}(f,t) = \sum_{k=1}^K A_k \exp \left(j \frac{4\pi(f+f_c)}{c} R_{ref} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi(f+f_c)}{c} (x_k + y_k\theta(t)) \right) \quad (29)$$

위 수식에서 알 수 있듯이 fast-time 주파수 f 와 회전운동에 의한 거리 이동 성분 $\theta(t)$ 는 서로 연관되어있다. f 와 $\theta(t)$ 사이의 연관에 의한 거리 왜곡을 제거하기 위해서 비율이 변경된 새로운 slow-time 변수 τ 를 식 (30)과 같이 정의하여 keystone 변환을 수행한다.

$$\tau = \left(\frac{f_c+f}{f_c} \right) t \Rightarrow t = \left(\frac{f_c}{f_c+f} \right) \tau \quad (30)$$

V. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞서 기술한 파형 설계 및 신호처리 결과를 기술한다. 대표적인 시뮬레이션 입력 파라미터들은 표 1과 같다.

표적 요동 정보는 그림 3과 같다. 표적은 롤 방향으로 sinusoidal 운동을 하고, 피치, 요(Yaw) 방향으로는 회전운동을 하지 않는다고 가정한다.

표 1. 입력 항목

Table 1. Input parameters

Parameters		Value
HW	Antenna gain	35dB
	Sampling frequency	360MHz
	Center frequency	10GHz
	NESZ	-15dB
Mission	Platform velocity	570kts
	Altitude	44kft
	Slant range	80km
	Squint angle	0°
Target	Ship height	40m
	Ship motion	sinusoidal
	CPI	1.1419s

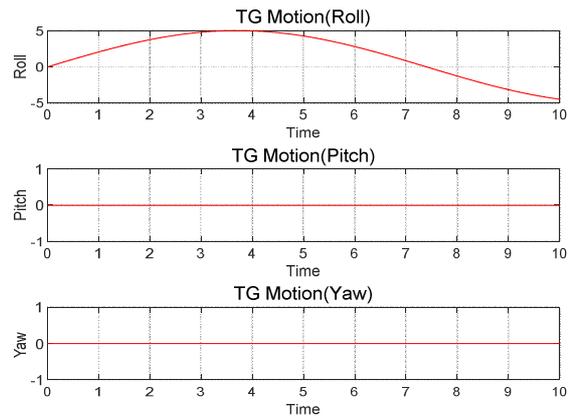


그림 3. 표적 요동

Fig. 3. Motion of target

표 1의 입력값을 기반으로 파형 설계를 진행하였을 때, LPI/ECCM 모드 파형 설계 결과는 표 2와 같다. LPI 모드의 경우 저피탐 효과 극대화를 위해 ECCM 모드 보다 작은 최대 송신 전력과 긴 듀티비율 가진다. PRF는 송수신 eclipse를 만족하는 구간에서 최고 듀티비에 의해 계산되어 ECCM 모드와 다르게 설정된다. 2.1장의 인터셉터 민감도는 설계된 최대 송신 전력을 기반으로 계산할 수 있다.

표 2. 파형 설계 결과

Table 2. Waveform design results

Mode	Parameters	Value
LPI	PRF	1498 Hz
	Peak power	12 W
	Duty cycle	0.49 %
ECCM	PRF	676 Hz
	Peak power	2000 W
	Duty cycle	0.13 %

일반 chirp 파형을 적용하였을 때, ECCM 모드 재밍 모델은 ISAR 영상에서 그림 4~7과 같이 나타나고, 점선 안의 영상이 재밍 신호이다. 그림 4는 MCDJ 재밍으로, 실제 표적 뒤쪽 거리방향으로 일정한 지연을 가지는 점 표적 재밍 신호가 생성되고, 그림 5는 NCJ 재밍으로, 재밍 폭으로 선정된 거리방향 영역에서 노이즈 재밍 신호가 생성된다.

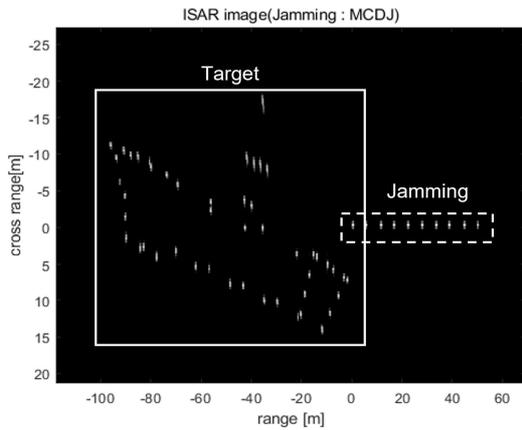


그림 4. MCDJ 재밍 모델 예제
Fig. 4. Example of MCDJ jamming model

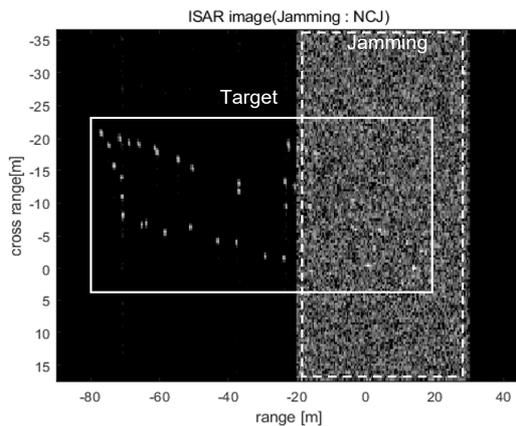


그림 5. NCJ 재밍 모델 예제
Fig. 5. Example of NCJ jamming model

그림 6은 ICJ 재밍으로 설정한 특정 영역에서 재밍 신호가 생성되고, 그림 7은 FTJ 재밍으로 허위 표적이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

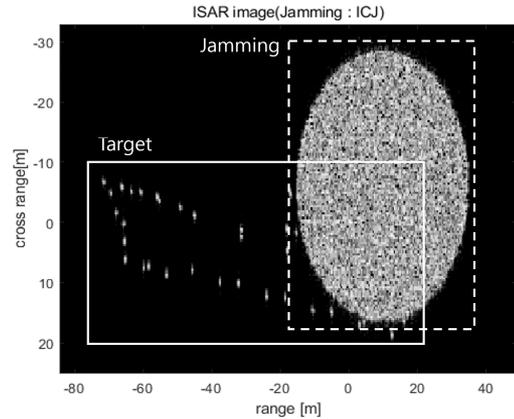


그림 6. ICJ 재밍 모델 예제
Fig. 6. Example of ICJ jamming model

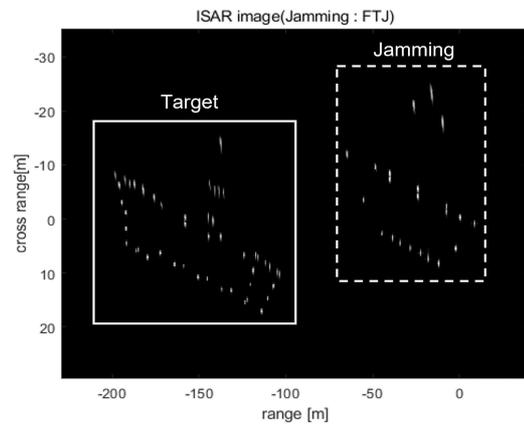


그림 7. FTJ 재밍 모델 예제
Fig. 7. Example of FTJ jamming model

그림 8은 LPI 모드 파형 설계를 기반으로 PI code를 적용하여 신호처리를 진행하였을 때의 결과로, ISAR 영상 형성이 잘 되는 것을 확인할 수 있다. 이때, 레이더 송신신호 전력은 -78.12 dBW, 수신 잡음 전력은 -56.20 dBW로 설계하였다.

현재 펄스에 대한 재밍 신호가 다음 신호에 수신된다는 가정하에서 ECCM 모드에서 OFDM 파형, ICJ 재밍을 적용하였을 때, 그림 9에서처럼 펄스 간의 직교성에 의해 재밍 신호가 제거된다. ECCM 모드에서는 재밍 신호가 제거되면서 노이즈 형태로 영상 전반적으로 깔리게 된다. 이때, 레이더 송신신호 전력은 -66.97 dBW, 수신 잡음 전력은 -56.20 dBW, 수신 재밍 전력은 -49.8422 dBW로 설계하였다.

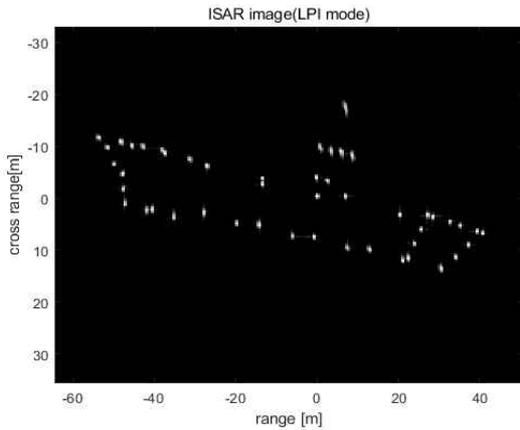


그림 8. ISAR 영상 (LPI 모드)
Fig. 8. ISAR image (LPI mode)

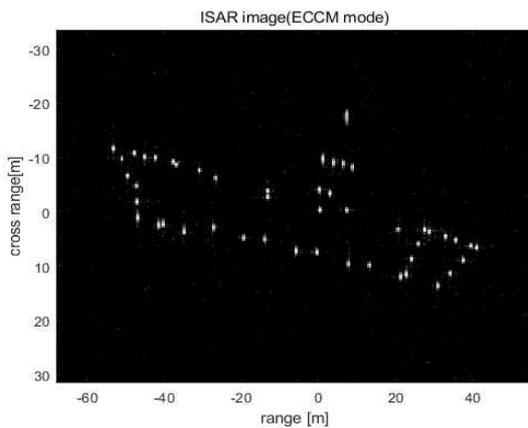


그림 9. ISAR 영상 (ECCM 모드)
Fig. 9. ISAR image (ECCM mode)

VI. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 LPI 환경에서 저피탐 효과를 극대화하기 위한 듀티비 및 최대 송신 전력 계산과 LPI 파형 변조 기법들에 대해 기술 하였고, ECCM 환경에서는 DRFM 재밍이 존재한다고 가정하였을 때, 펄스 다양성을 이용할 수 있는 변조 기법들을 파형 설계에 적용하였다.

ECCM 모드에서 재밍 신호 생성 방법 및 모델링에 대해 기술하였고, 해당 결과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

파형 설계를 기반으로 파형을 생성한 후, ISAR 신호처리를 통하여 LPI 모드에서는 ISAR 영상이 잘 형성되고, ECCM 모드에서는 ISAR 영상에서 재밍 효과가 사라지는 것을 확인하였다.

References

- [1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithm", Artech House, 1995.
- [2] A. W. Doerry, "Performance Limits for Maritime Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)", Sandia National Laboratories, Nov. 2013. <https://doi.org/10.2172/1121940>.
- [3] D. Zhu, L. Wang, Y. Yu, Q. Tao, and Z. Zhu, "Robust ISAR Range Alignment via Minimizing the Entropy of the Average Range Profile", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 6, No. 2, pp. 204-208, Apr. 2009. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.2010562>.
- [4] Y. Li, T. Zhang, Z. Ding, W. Gao, and J. Chen, "An improved inverse synthetic aperture radar range alignment method based on maximum contrast", The Journal of Engineering, Vol. 2019 No. 19, pp. 5467-5470, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.0354>.
- [5] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR", IEE Proceedings - Radar Sonar and Navigation, Vol. 151, No. 4, pp. 203-209, Aug. 2004. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-rsn:20040692>.
- [6] M. A. Richards, "The Keystone Transformation for Correcting Range Migration in Range-Doppler Processing", Georgia Institute of Technology, Mar. 2014.
- [7] P. Pace, "Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar", Second Edition, Artech House, pp. 125-193, 2009.
- [8] X. Yu, Y. Fu, L. Nie, G. Zhao, and W. Zhang, "A Waveform with Low Intercept Probability for OFDM SAR", Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, pp. 8-11 Aug. 2016. <https://doi.org/10.1109/piers.2016.7734869>.
- [9] M. A. Govoni and R. A. Elwell, "SAR image

quality using advanced pulse compression noise (APCN)", Radar Sensor Technology XVIII, Vol. 90770, May 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2051347>.

- [10] F. Luhong, P. Yiming, H. Shunji, and H. Yinming, "A Comparison of Some Electronic Countermeasures on Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)", Journal of Electronics (China), Vol. 23, No. 1, pp. 132-135, Jan. 2006. <https://doi.org/10.1007/s11767-004-0252-6>.
- [11] M. Guo, H. Zhu, N. Tai, C. Wang, and N. Yuan, "Study on jamming method of inverse synthetic aperture radar based on three platform", 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, May 2016. <https://doi.org/10.1109/itnec.2016.7560441>.
- [12] Z. Yupeng, W. Liang, W. Hongqiang, and L. Xiang, "Anti-jamming of Inverse Synthetic Aperture Radar based on Slope-varying Linear Frequency Modulation Signal", Defence Science Journal, Vol. 59, No. 5, pp. 537-544, Sep. 2009. <http://dx.doi.org/10.14429/dsj.59.1556>.
- [13] T. Huang, Y. Liu, G. Li, and X. Wang, "Randomized Stepped Frequency ISAR Imaging", 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA, May 2012. <https://doi.org/10.1109/radar.2012.6212202>.
- [14] J. Jin, X. Hu, and G. Xu, "Multi-constraint PRF Selection for Airborne Squint Spotlight SAR", 7th International Conference on Signal and Image Processing, Suzhou, China, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/icsip55141.2022.9887055>.
- [15] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", New York: McGraw-hill, pp. 82-92, Jan. 1980.
- [16] D. Lynch, "Introduction to RF Stealth", Scitech, 2004. <https://doi.org/10.1049/sbra120e>.
- [17] H. Lee and K.-W. Kim, "An Integrated Raw Data Simulator for Airborne Spotlight ECCM SAR", Remote Sens, Vol. 14, No. 16, pp. 3897, Aug. 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14163897>.

저자소개

손 인 혜 (In-Hye Son)



2011년 2월 : 경북대학교
전기전자공학과(공학사)
2013년 2월 : 한국과학기술원
전기전자공학과(공학석사)
2013년 2월 ~ 현재 :
국방과학연구소 연구원
관심분야 : ISAR, SAR, 신호처리,

RADAR

윤 상 호 (Sang-Ho Yoon)



1999년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학사)
2001년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2004년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2004년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 연구원

관심분야 : 레이더 시스템, SAR 시스템

김 기 완 (Ki-Wan Kim)



2000년 2월 : 전북대학교
항공우주공학(공학사)
2002년 2월 : 전북대학교
항공우주공학(공학석사)
2006년 2월 : 한국과학기술원
항공우주공학(공학박사)
2006년 1월 ~ 현재 :

국방과학연구소 연구원

관심분야 : 항공기 탑재 레이더/SAR 시스템