

# 엔트로피 기반의 ISAR 자동 초점 기법에 대한 성능 분석

## Analysis of Performance for Entropy-Based ISAR Autofocus Technique

배준우 · 김경태 · 이진호\* · 임정흠\*

Jun-Woo Bae · Kyung-Tae Kim · Jin-Ho Lee\* · Jeong-Heom Im\*

### 요 약

ISAR 자동 초점(autofocus) 기법이란 움직이는 표적에 대한 2차원 레이더 영상인 ISAR 영상을 얻을 때 표적에 의한 doppler-shift 때문에 발생하는 위상 오차를 예측, 제거하는 기법이다. 이러한 자동 초점 기법이 수행되지 않은 ISAR 영상은 위상 오차(phase error)에 의한 왜곡이 포함되기 때문에 초점이 맞지 않는 것처럼 흐린(blurred) 영상이 된다. 이러한 영상은 추후에 구분기(classifier)를 이용하여 표적 구분 시 올바른 구분을 보장할 수 없으므로 반드시 자동 초점 기법이 수행되어야 하며, 본 논문에서는 이를 위해 영상의 엔트로피(entropy)를 최소화시키는 알고리즘을 이용한다. ISAR 자동 초점 기법은 크게 range alignment 과정과 phase adjustment 과정으로 나뉘는데, range alignment 과정에서 샘플링 포인트(sampling point)의 수와 그에 따른 영상 품질과의 관계를 분석하고, phase adjustment 과정을 수행하기 위한 알고리즘인 SSA(Stage-by-Stage Approaching)의 계산시간 단축을 위한 방법을 분석한다.

### Abstract

Two-dimensional(2-D) radar images, namely, ISAR images from a maneuvering target include unwanted phase errors due to the target's motion. These phase errors make ISAR images to be blurred. The ISAR autofocus technique is required in order to remove these unwanted phase errors. Unless those unwanted phase errors produced by the target's motion are removed prior to target identification, we cannot expect a reliable target identification performance. In this paper, we use the entropy-based ISAR autofocus technique which consists of two steps: range alignment and phase adjustment. We analyze a relationship between the number of sampling point and a image quality in a range alignment algorithm and also analyze a technique for reducing computation time of the SSA(Stage-by-Stage Approaching) algorithm in a phase adjustment.

Key words : ISAR, Autofocus, Motion Compensation, Chirp Pulse Radar, Target Identification, Entropy

### I. 서 론

레이더 신호는 크게 1차원 range profile과 2차원 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상으로 나뉘며, 이 영상들은 표적의 고유한 반사계수 분포를 1차원 또는 2차원 상에 나타내어 준다.

그 중 ISAR 영상은 스펙트럼 예측 기법을 이용하

여 표적에 대한 반사 특성을 2차원적으로 보여주는 것으로 표적의 레이더 반사 면적(radar cross section: RCS) 데이터를 이용한 표적의 RCS 증상 분석<sup>[1],[2]</sup> 및 구분<sup>[3]</sup>에 이용된다.

ISAR 영상을 획득하기 위해서는 서로 다른 관측 각에서 측정된 여러 개의 range profile을 순서대로 정렬한 후, 연접처리(coherent processing)를 해주어야

「본 연구는 국방과학연구소와 한국항공우주연구원의 연구비 지원으로 수행되었음.」

영남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

\*한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

· 논문 번호 : 20061110-140

· 수정완료일자 : 2006년 12월 11일

하는데, 이동하는 표적의 1차원 레이더 영상 즉, range profile은 표적과 레이더 사이의 직선 성분인 RLOS(Radar Line Of Sight)상의 표적의 수평(translational) 이동 성분에 의해 발생하는 doppler-shift 현상 때문에 흐려진다. 이러한 위상 왜곡이 포함된 흐려진 영상으로는 표적을 구분하는데 이용할 수가 없으며, 따라서 구분기를 이용해 표적을 제대로 인식하기 위해서는 반드시 자동 초점 기법이 수반되어야 한다<sup>[4],[5]</sup>.

본 논문에서는 chirp 레이더 기반에서 위상 오차가 제거된 고해상도 ISAR 영상을 획득하기 위한 기법인 엔트로피 기반의 자동 초점 기법을 분석한다. 이 기법은 크게 range alignment 과정과 phase adjustment 과정으로 나누어지며, phase adjustment 과정 수행 시에 위상 오차를 보정하기 위해서 보정 지표로 엔트로피를 이용하는 SSA(Stage-by-Stage Approaching) 알고리즘을 사용한다<sup>[5]</sup>.

다음 절에서는 chirp 레이더 신호 모델링과 위상 오차가 보정된 2차원 ISAR 영상을 얻기까지의 과정을 간략히 설명하며, 마지막 절에서는 range alignment 과정에서 샘플링 포인트와 영상 품질과의 관계에 대해 분석하고, phase adjustment 과정에서 SSA 알고리즘의 계산 시간을 단축시키기 위한 알고리즘을 분석한다.

## II. 본 론

### 2-1 ISAR 영상 획득을 위한 기본 이론

3차원 좌표계(x, y, z)의 (x, z) 평면상에서 속도 v 가속도 a로 기동하고 있는 표적이 있다고 가정한다 (그림 1). 기하 산란 이론(geometrical theory of diffraction: GTD)로부터<sup>[6]</sup>, chirp 펄스 레이더 기반에서 표적 산란점(scattering center)들로부터 되돌아온 신호 s(t)는

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \exp \left[ j2\pi \left( (f_0 + f_d)(t - \tau_k) + 0.5 \frac{B}{\tau} (t - \tau_k)^2 \right) \right] \times \text{rect} \left( \frac{t - \tau_k}{\tau} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\tau = \frac{c-v}{c+v} \tau$ ,  $f_d = \frac{2v}{c} f_0$ 로 표현할 수 있다. K는 표적 산란점의 개수이고,  $A_k$ 는 각 산란점의 크기이다.  $f_0$ 는 반송 주파수,  $f_d$ 는 도플러 주파수,  $\tau$

는 레이더에서 전송한 펄스의 폭,  $\tau'$ 은 표적에서부터 반사되어 돌아온 펄스의 폭이다. 그리고 c는 빛의 속도,  $\tau_k$ 는 각 산란점과 레이더 사이의 거리이다. 표적에 반사되어 레이더로 돌아오는 신호 s(t)를 얻었다면 펄스 압축 과정을 수행하기 위해 정합 필터(matched filter)에 통과시킨다.

정합 필터를 통과한 신호는  $m \times n$  복소행렬이 된다. m은 레이더 반사파들의 수로서  $m=0, \dots, M-1$ 이며, n은 샘플링된 샘플들의 수로서  $n=0, \dots, N-1$ 이다. 이 데이터를  $G(m, n)$ 이라 표기하고, 다음 II-2절과 II-3절에서 소개할 기법들을 적용하여 위상 오차를 제거한 신호를  $I(m, n)$ 이라 한다.  $m \times n$  ISAR 영상을  $I(m, n)$

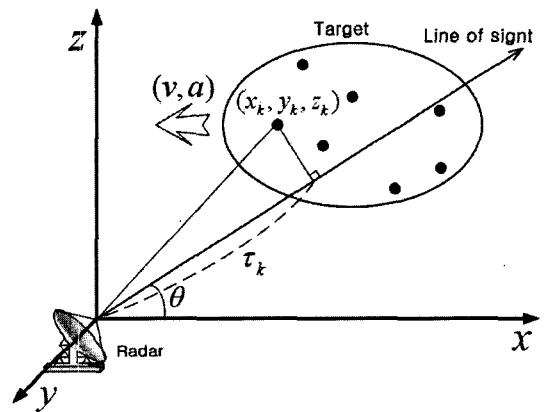


그림 1. ISAR 영상을 위한 기하학적 도식  
Fig. 1. Geometrical illustration for ISAR imaging.

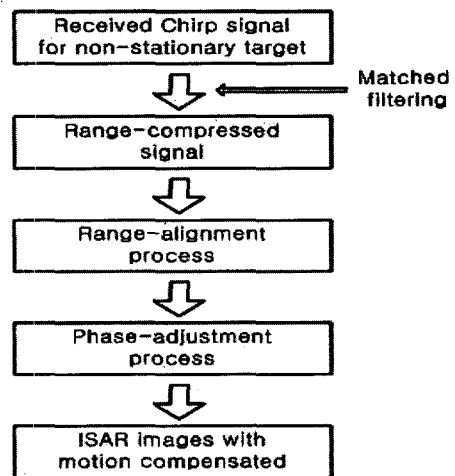


그림 2. ISAR 영상 획득 과정  
Fig. 2. Procedures for ISAR imaging.

이라 한다면,

$$I(m, n) = DFT_m[G'(m, n)] \quad (2)$$

관계가 성립한다<sup>[5]</sup>. DFT는 이산 푸리에 변환을 나타낸다. ISAR 자동 초점 기법이 적용된 영상을 얻기 위한 전체 과정은 그림 2에 나타내었다.

### 2-2 Range-alignment 과정

표적이 움직임에 관계없이 올바른 표적의 ISAR 영상을 획득하기 위해서는 자동 초점 기법을 통해서 표적의 움직임에 의한 영향을 없애주는 과정이 필수적이다. 자동 초점 과정은 각 range profile들의 중심을 일치시켜 주는 range alignment 과정과 이후 cross range 방향의 위상 에러를 없애주는 phase adjustment 과정으로 나누어진다.

먼저 range alignment 과정을 설명하면, 고정된 표적인 경우에는 하나의 range-bin 내에 하나의 표적 산란점이 위치하게 되는데 실제 환경에서는 표적이 기동하고 있으므로 하나의 range-bin에 대응되는 산란점이 다른 range-bin으로 이동하는 현상이 발생한다. 이러한 현상은 영상을 왜곡시키는 원인이 되고, 이동된 산란점을 다시 본래의 range-bin안으로 이동시키는 과정을 수행해 주어야 하는데, 이를 range alignment라 한다. 레이더 반사파들의 alignment 정도를 측정하기 위한 비용 함수(cost function)로 엔트로피 함수를 이용한다<sup>[7]</sup>. 레이더 반사파 중 임의의 두 인접한 신호를  $G_m(n)$ 과  $G_{m+1}(n)$ 라 가정하자. 두 신호 사이의 엔트로피는

$$H_{G_m, G_{m+1}}^e(\tau) = - \sum_{n=0}^{N-1} \overline{G}(\tau, n) \ln \overline{G}(\tau, n) \quad (3)$$

$$\overline{G}(\tau, n) = \frac{|G_m(n)| + |G_{m+1}(n-\tau)|}{\sum_{n=1}^{N-1} (|G_m(n)| + |G_{m+1}(n-\tau)|)} \quad (4)$$

로 정의된다.  $\tau_0$ 를 두 신호 사이의 delay라 하면,

$$\hat{\tau}_0 = \arg \min_{\tau} [H_{G_m, G_{m+1}}^e(\tau)] \quad (5)$$

로 정의되며, 위식에서 예측된  $\tau_0$ 를 이용해  $(m+1)$ 번째 반사파를 정렬시켜 보면,

$$G_{m+1}(n) = G_{m+1}(n - \hat{\tau}_0) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다.  $G_{m+1}(n)$ 은 정렬된  $(m+1)$ 번째 신호를 의미한다.

### 2-3 Phase Adjustment 과정

Range alignment 과정을 수행했다면 모든 산란점들은 본래의 range-bin속에 위치한다고 간주한다. 하지만 여전히 위상 오차가 포함되어 있어 이를 완전히 제거하기 전에는 왜곡이 없는 영상을 얻을 수가 없다. 이 절에서는 이러한 위상 오차를 제거하는 과정을 설명한다.

$m$ 개의 반사파에 대한 위상 오차를 벡터 형식으로 표현한다면,

$$\Phi_e = [\phi_e(0) \phi_e(1) \cdots \phi_e(M-1)]^T_{1 \times M} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있고  $\phi_e(0) = 0$ ,  $\phi_e(m) \in [-\pi, \pi]$  여기서  $m = 1, 2, \dots, M-1$ 로 둔다. 이를 이용하여 위상 오차 보정후의 데이터를 구한다면,

$$G'(m, n) = G(m, n) \exp[-j\phi_e(m)] \quad (8)$$

로 표현 가능하며  $G(m, n)$ 은 range alignment 과정후의 데이터이다. 최종적으로 ISAR 영상을 얻기 위해서는 식 (2)를 이용하면 된다.

정규화된 영상은

$$\overline{I}_{m, n}(\Phi_e) = \frac{|I_{m, n}(\Phi_e)|^2}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |I_{m, n}(\Phi_e)|^2} \quad (9)$$

로 표현되며, 이를 이용하여 영상의 2-D 엔트로피를 구해본다면,

$$H_e(\Phi_e) = - \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \overline{I}_{m, n}(\Phi_e) \ln [\overline{I}_{m, n}(\Phi_e)] \quad (10)$$

라고 할 수 있다. 위 식에서 구한 엔트로피의 값이 최소가 될 때의 위상 오차  $\Phi_e$ 가 우리가 원하는 왜곡이 없는 영상을 얻기 위해 반드시 예측해야 하는 위상오차  $\Phi_e$ 가 될 것이 분명하다.

$$\Phi_e = \arg \min_{\Phi_e} H[\overline{I}_{m, n}(\Phi_e)] \quad (11)$$

엔트로피 최소화 개념은 매개변수를 통한 모델링으로 각 range profile의 중심 위치의 변화를 근사화

하지 않기 때문에 각 range profile의 중심이 임의로 분포되어 있어도 정렬된 range profile time-history를 얻을 수 있다. Range profile time-history란 서로 다른 관측각에서 측정된 여러 개의 range profile을 순서대로 정렬한 것을 의미한다. 실제로 2-D 엔트로피 값의 최소화를 통한 위상 오차를 구하는 알고리즘으로 본 논문에서는 SSA 알고리즘<sup>17)</sup>을 적용하였다. SSA를 이용하면 매개변수를 정의하지 않고 cross range 방향의 위상 에러를 없애주기 때문에 어떠한 임의의 위상 에러도 보상해 줄 수 있다는 장점이 있다.

### III. 실험 결과

#### 3-1 실험 조건 및 결과

신호 대 잡음비(SNR)가 0인 환경에서  $(x, y, z) = (20 \text{ km}, 0 \text{ km}, 1 \text{ km})$ 에 위치한 표적(그림 3(a))이  $-x$  방향으로 속도 880 m/s, 가속도 30 m/s<sup>2</sup>으로 움직이고 있다고 가정한다. 실험을 위한 레이더 파라미터는 표 1에 표기하였다. 데이터를 range alignment 시킨 후는 그림 3(b)와 같고 range-bin이 정렬되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 range alignment 과정 후에 SSA 알고리즘을 수행하지 않고 ISAR 영상을 만든 것인데 위상 오차 때문에 왜곡이 생긴 것을 확인할 수 있다. 그림 3(d)는 위상 오차를 SSA 알고리즘을 통해 완벽히 추정, 제거한 후 식 (2)를 사용하여 ISAR 영상을 만든 것이다.

#### 3-2 샘플링 주파수와 표적의 이동속도가 Range Alignment 과정에 미치는 영향

앞서 II-2에서 설명했듯이, range alignment 과정은

표 1. 레이더 파라미터  
Table 1. Radar parameters.

Item	Value
Bandwidth	400 MHz
Carrier frequency	9 GHz
Pulse width	30 $\mu$ s
Pulse number	128
PRF	1000 Hz
Sampling frequency	2.5×bandwidth

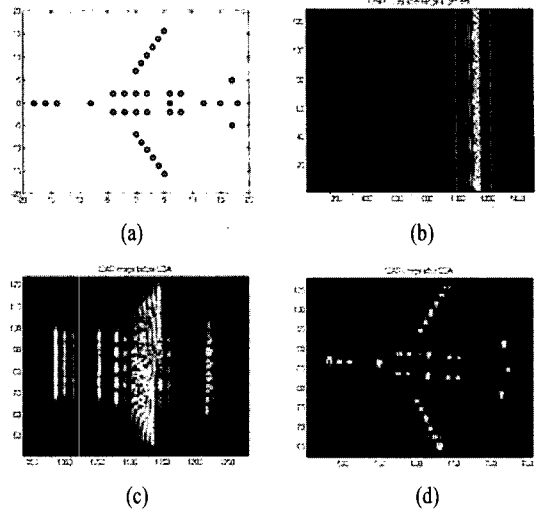


그림 3. (a) 표적 산란점 모델, (b) Range alignment 후의 time-history, (c) SSA 적용전의 ISAR 영상, (d) SSA 적용후의 ISAR 영상

Fig. 3. (a) Target scattering center model, (b) Time-history after range alignment, (c) ISAR image before SSA, (d) ISAR image after SSA.

인접한 두 신호 사이의 정렬 정도를 엔트로피를 이용해 계산하여야 하므로 range-bin의 수 즉, 샘플링 포인트가 계산시간에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 샘플링 주파수가 높아질수록 계산시간이 늘어나게 되는 것은 자명한 사실이다.

레이더 신호 스펙트럼의 겹침(foldover) 현상을 피하도록 샘플링 포인트의 수를 결정하려면 아래의 나이퀴스트(Nyquist) 이론을 만족해야 한다.

$$f_s \geq 2BW$$

여기서  $f_s$ 는 샘플링 주파수를 의미하고  $BW$ 는 시스템의 대역폭을 의미한다. 그러므로 샘플링 주파수는 레이더 시스템 대역폭(bandwidth)의 두 배 이상으로 해주어야 하는데, 이에 대해 여러 가지 실험 조건을 설정해 두고 레이더 시스템의 샘플링 주파수가 영상 품질에 미치는 영향을 분석한다. 그리고 표적의 이동 속도가 정렬(alignment) 과정에 미치는 영향도 함께 분석한다.

#### 3-2-1 샘플링 주파수와 영상 품질 사이의 관계

먼저 시스템 대역폭의 차이에 의한 샘플링 주파수가 영상 품질에 미치는 영향을 살펴보기 위해 속

도 200 m/s, 가속도  $30 \text{ m/s}^2$ 의 속도로 이동 중인 표적이 있다고 가정한다.

그림 4는 표 1의 레이더 파라미터에서  $BW$ 가 100 MHz일 경우에 (a)열은 range alignment 과정 후의 time-history를 확대해서 나타내었고, (b)열은 ISAR 영상을 확대하여 나타낸 것이다.  $f_s$ 는 그림에서 위의 행부터 차례로  $BW \times 1, 2, 2.5$ 로 변화를 주면서 실험해 보았다.

그림 4를 살펴보면,  $f_s$ 가 작을수록 range alignment 후의 정렬 상태가 나빠지는 것을 확인할 수 있다.  $f_s$ 가  $BW$ 의 1배인 경우를 나타내는 첫 번째 행의 영상들을 살펴보면, 샘플링 포인트의 수가 너무 적어서 range alignment 과정과 이후의 phase adjustment 과정을 제대로 수행하지 못했기 때문에 ISAR 영상의 획득을 하지 못했으며,  $f_s$ 가  $BW$ 의 2배인 경우를 나타내는 두 번째 행의 영상들을 살펴보면, range alignment 과정 후의 time-history 영상 가운데 부분에 나타나는

이 range alignment 과정이 제대로 수행되지 못했다는 것을 확인할 수 있다. 그리고  $f_s$ 가  $BW$ 의 2.5배인 경우에는 range alignment 과정이 제대로 수행된 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 레이더의 대역폭이 보다 넓은 경우를 실험하기 위한 것으로 표 1의 레이더 파라미터를 이용하였다. 그림 5를 살펴보면 넓은 대역폭으로 인해 더 좋은 해상도를 나타내지만 대역폭이 좁은 경우와 마찬가지로  $f_s$ 가 작을수록 range alignment 후의 정렬 상태와 ISAR 영상이 나빠지는 것을 확인할 수 있다.

이상의 실험 결과들은 샘플링 포인트의 수가 늘어날수록 즉, 샘플링 주파수가 높아질수록 range alignment의 정렬 성능은 좋아지고 ISAR 영상 품질도 좋아진다는 것을 나타낸다. 그리고 이러한 사실은 레이더의 대역폭이 좁을수록 명백히 드러난다. 하지만 샘플링 포인트의 수가 증가할수록 그에 따라

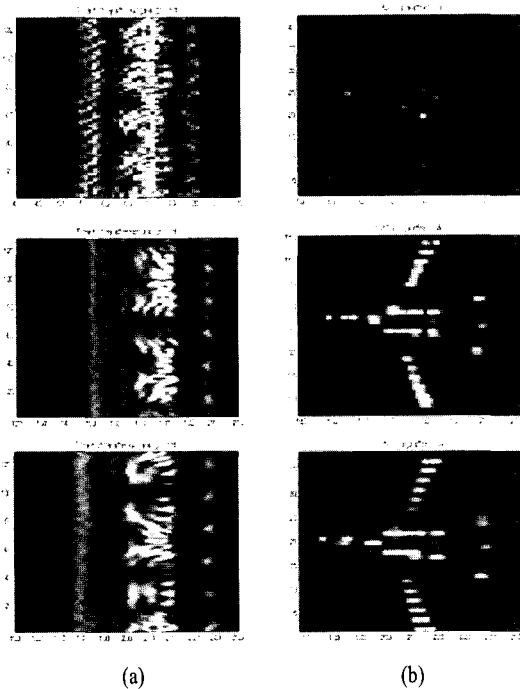


그림 4. 시스템 대역폭이 100 MHz(해상도 1.5 m) 일 때의(위의 행부터  $f_s=BW \times 1, 2, 2.5$ 일 경우) (a) Range alignment 과정 후의 time-history, (b) ISAR 영상

Fig. 4. In case of  $BW=100$  MHz(resolution=1.5 m), ( $f_s=BW \times 1, 2, 2.5$  from the top row) (a) Time-history after range alignment, (b) ISAR image.

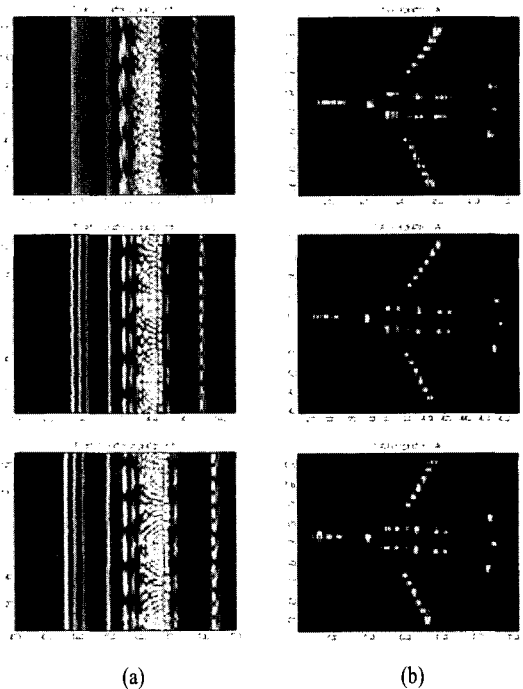


그림 5. 시스템 대역폭이 400 MHz(해상도 0.375 m) 일 때의(위의 행부터  $f_s=BW \times 1, 2, 2.5$ 일 경우) (a) Range alignment과정 후의 time-history, (b) ISAR 영상

Fig. 5. In case of  $BW=400$  MHz(resolution=0.375 m), ( $f_s=BW \times 1, 2, 2.5$  from the top row) (a) Time-history after range alignment, (b) ISAR image.

range alignment 과정을 수행하는데 필요한 계산 시간이 증가하기 때문에 무엇보다 계산 시간과 영상 품질 사이의 trade-off 관계를 유념해야 하며, 미리 설정된 시스템 대역폭 내에서 영상 품질의 향상에는 한계가 있다. 실험 결과에 의하면 샘플링 포인트를 증가시키면 해상도는 좋아지지만, 미미한 해상도의 증가분에 비해 계산시간의 증가로 인한 단점이 더 커지는 것을 확인했으며,  $f_s$ 를 나이퀴스트 샘플링 이론에 따라 레이더 시스템 대역폭의 2.5배로 두면 설정된 레이더의 대역폭과는 관계없이 적절한 계산 시간과 성공적인 range alignment 과정의 수행을 보장한다는 것을 확인하였다.

### 3-2-2 표적의 이동속도가 Range Alignment에 미치는 영향

다음으로 이동 중인 표적의 속도가 range alignment에 미치는 영향을 분석하기 위해 표 1의 파라미터 중 대역폭만 100 MHz로 수정한 레이더 시스템으로 200 m/s과 880 m/s 두 종류의 속도를 가진 표적이 있을 때 각각의 표적에 대한 실험을 하였다. 두 개의 표적 모두 가속도는  $30 \text{ m/s}^2$ 이며, 샘플링 주파수는 레이더 대역폭의 2.5배가 되도록 설정하였다.

그림 6은 실험 결과를 나타낸다. (a)열은 이동속도가 200 m/s인 표적에 대한 결과이고, (b)열은 880 m/s인 표적에 대한 결과이다. 그리고 그림에서 첫 번째 행의 그림들은 range alignment 과정 전의 range profile time-history를 나타내고, 두 번째 행의 그림들은 range alignment 과정 후의 range profile time-history, 마지막 행의 그림들은 확대한 ISAR 영상을 나타낸다.

실험에 따르면, 표적의 이동속도는 range alignment 과정을 수행하는데 큰 영향을 주지 못한다는 것을 확인할 수 있다. 느린 속도로 이동하는 표적에 비해 빠른 속도로 이동하는 표적은 관측시간동안 더 많은 거리를 이동할 것이며, 그 결과 range-bin도 더 많이 이동할 것이 분명하다. 하지만 range alignment 과정을 진행하면 표적의 이동속도와는 무관하게 range-bin이 정렬된다는 것이 확인 가능하다.

### 3-3 계산 시간 단축을 위한 방법

실험결과(그림 3)에서 확인 가능하듯이 SSA 알고

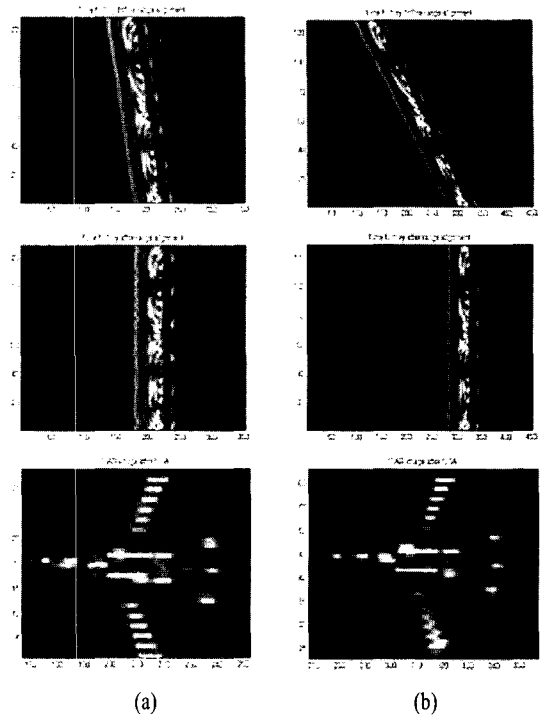


그림 6.  $BW=100 \text{ MHz}$ ,  $f_s=2.5 \times BW$ 일 때, range alignment 과정 전의 time-history, range alignment 과정 후의 time-history, ISAR 영상(위의 행부터) (a) 속도 200 m/s인 표적, (b) 속도 880 m/s인 표적

Fig. 6. In case of  $BW=100 \text{ MHz}$ ,  $f_s=2.5 \times BW$ , time-history before range alignment, time-history after range alignment, ISAR image(from the top row) (a) Maneuvering target with 200 m/s, (b) Maneuvering target with 880 m/s.

리즘을 사용하면 위상 오차를 정확히 제거할 수 있다. 그러나 SSA 알고리즘은 계산시간이 많이 소비된다는 단점을 가지고 있다. 그래서 본 논문에서는 전체의 range-bin을 이용해 SSA를 적용하는 대신, 선택된  $n$ 개의 range-bin만으로 SSA 알고리즘을 수행하여 계산시간을 줄이는 방법을 분석한다<sup>[7]</sup>. Range-bin을 선택하기 위해서는 각 range-bin에 분포하는 에너지를 이용한다.

Range-bin 추출 과정은 - (1) 정렬된 데이터들(그림 3(b))의 에너지를 계산하여 down range 방향으로 누적한다. (2) 누적하면 그림 7과 같은 데이터를 얻을 수 있는데 에너지의 크기가 큰 peak에 해당하는 range-bin부터 내림차순으로 정렬한다. (3) 에너지가

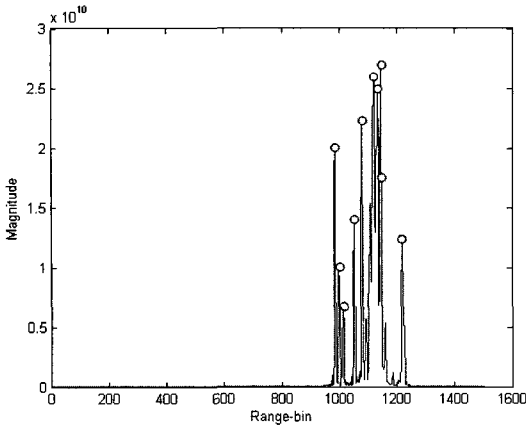


그림 7. Down-range 방향으로 에너지를 누적한 다음, 에너지가 큰 10개의 range-bin 추출,  $n=10$ (추출된 range-bin에 해당하는 peak는 원으로 표시)  
 Fig. 7. 10 range-bins are chosen according to order of peak values of accumulated energy,  $n=10$ (denoted by circles).

큰 순서부터 원하는  $n$ 개의 range-bin 수만큼 추출한다. 그림 7은 표 1의 파라미터를 이용하여 앞서 기술한 과정으로 10개의 range-bin 추출한 예를 나타낸 것이다. 선택된 range-bin에 포함된 에너지가 전체 에너지에 차지하는 비  $\gamma$ (%)는

$$\gamma(\%) = \frac{\text{선택된 } n\text{개의 range bin에 포함된 에너지}}{\text{전체 에너지}} \times 100$$

으로 정의된다.

표 2는 표 1의 파라미터를 이용하여 만든 것으로, 첫 번째 행은 선택된 range-bin의 수를 의미하고 두 번째 행은 선택된 range-bin들에 포함된 에너지가 전체 에너지에 대해 차지하는 비  $\gamma$ 를 나타낸다. 표 2를 참조하면, range-bin을 60개 선택했을 때 그 속에

표 2. 선택한 range-bin의 수  $n$ 과 그것에 포함된 에너지가 전체 에너지에 대해 차지하는 비율  $\gamma$   
 Table 2. The number of selected range-bin  $n$  and the ratio  $\gamma$ .

BW	$n$	2	3	6	13	19	36	60	1501
400 MHz	$\gamma$ (%)	3	5	10	20	30	50	70	100

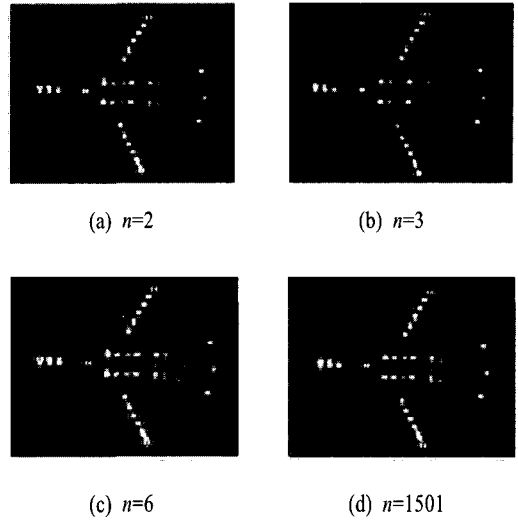


그림 8. 에너지가 많이 포함된 순서로  $n$ 개의 range-bin을 추출하여 SSA를 실행한 후 만든 ISAR 영상( $BW=400$  MHz)  
 Fig. 8. ISAR images after the SSA algorithm using selected  $n$  range-bins arranged in descending order of energy( $BW=400$  MHz).

포함된 에너지는 전체 에너지의 70%를 차지한다는 것을 알 수 있다( $\gamma=70$ ).

그림 8은 선택된 수만큼의 range-bin을 이용하여 SSA를 실행한 후 만든 ISAR 영상이다. 이 영상들은 해상도가 0.375 m인 넓은 대역폭(400 MHz)을 가진 레이더를 이용하여 얻었다. 이런 고해상도일 경우에는 그림 8에서 나타나듯이 매우 적은 양의 에너지를 포함하도록 range-bin의 수를 설정해도 모든 range-bin을 이용했을 때와 비교해서 영상 품질이 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

표 3은 표 1에서 대역폭만 좁게(100 MHz) 설정하여 준 것으로 그에 따른 해상도가 1.5 m이다. 표 3을 참조하면, range-bin을 44개 선택했을 때 그 속에 포

표 3. 선택한 range-bin의 수  $n$ 과 그것에 포함된 에너지가 전체 에너지에 대해 차지하는 비율  $\gamma$   
 Table 3. The number of selected range-bin  $n$  and the ratio  $\gamma$ .

BW	$n$	3	8	15	19	25	32	44	451
100 MHz	$\gamma$ (%)	10	30	50	60	70	80	90	100

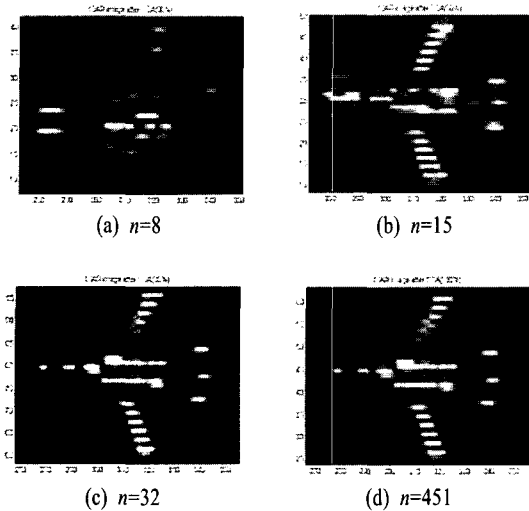


그림 9. 에너지가 많이 포함된 순서로  $n$ 개의 range-bin을 추출하여 SSA를 실행한 후 만든 ISAR 영상( $BW=100$  MHz)

Fig. 9. ISAR images after the SSA algorithm using selected  $n$  range-bins arranged in descending order of energy( $BW=100$  MHz).

함된 에너지는 전체 에너지의 90% ( $\gamma=90$ )를 차지한다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 그림 8과 마찬가지로 선택된 수만큼의 range-bin을 이용하여 SSA를 수행시킨 후 만든 ISAR 영상을 나타내고 있으며, 전체 에너지의 80% ( $\gamma=80$ ) 이상을 포함하도록 range-bin의 수를 설정해 주어야, 즉, 더 많은 range-bin을 선택하여 SSA 알고리즘에 이용해야 모든 range-bin을 이용하여 만든 ISAR 영상과 비교할 때 영상 품질이 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 좁은 대역폭을 가지고 있는 레이더의 경우에는 넓은 대역폭의 레이더에 비해 더 많은 에너지를 포함하도록 range-bin의 수를 설정해 주어야만 선택된 range-bin만을 이용하여 SSA 적용 후에 만든 ISAR의 영상 품질을 보장할 수가 있다.

그림 10은 표 2와 그림 8에 해당되는 레이더 파라미터를 이용하여 만든 결과이며, 선택된  $n$ 개의 range-bin을 이용하여 SSA를 실행시켰을 때 SSA 알고리즘이 수행되는데 소비된 계산시간을 나타낸다. 각 막대 위에 표기된 숫자는 계산 시간을 의미한다. 이는 10회 수행된 결과값의 평균값이며 전체 range-bin을 이용하여 SSA 알고리즘을 수행시킨다면 약 5,098초의 시간이 소비된다는 것을 알 수 있다. 그림 8과 10

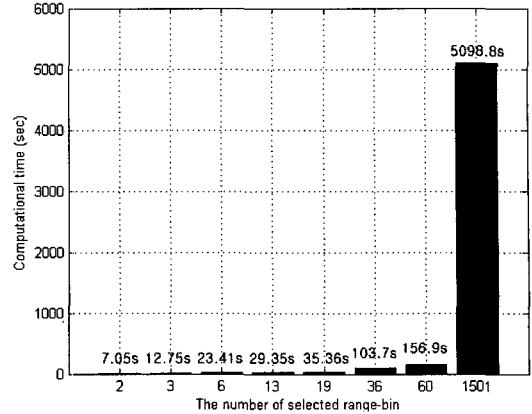


그림 10. 선택된 range-bin의 수와 계산시간과의 관계  
Fig. 10. The relationship between the number of selected range-bin and computation time.

을 참조하면 전체 에너지의 약 70% ( $\gamma=70$ ) 정도를 차지하도록 range-bin의 수를 60개로 설정해준 경우, 모든 range-bin을 이용하였을 때와 비교하여 영상 품질은 거의 유사하지만 SSA 알고리즘을 수행하는데 소비된 계산시간은 약 96.92% 감소했다는 것을 확인할 수 있다.

이상의 실험 결과를 종합해볼 때, 대역폭이 넓은 레이더인 경우에는 적은 수의 range-bin을 이용하여 SSA 알고리즘을 실행해 주어도 영상의 품질에 큰 영향 없이 계산시간을 90% 이상 줄일 수 있는 반면에, 대역폭이 좁은 레이더인 경우에는 대역폭이 넓은 경우보다 많은 range-bin을 이용하여 SSA 알고리즘을 실행해 주어야 영상의 품질에 큰 영향 없이 계산시간을 크게 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 움직이는 표적의 ISAR 영상을 얻기 위한 자동 초점 기법을 크게 range alignment 과정과 phase adjustment 과정으로 나누고 각 과정들을 실험을 통하여 분석하였다. Range alignment 과정의 진행에 있어서 표적의 이동속도는 별 영향을 미치지 않는 반면에 레이더 시스템의 샘플링 주파수는 range alignment 과정에 직접적으로 영향을 주며 나이퀴스트 샘플링 이론에 따라 레이더 시스템 대역폭의 2.5배 정도로 두면 적절한 계산시간과 성공적인 range alignment 과정의 수행을 보장한다는 것을 확



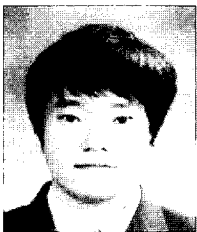
인하였다.

그리고 다음으로 phase adjustment 과정에 사용한 SSA 알고리즘의 계산시간 단축을 위하여 SSA 알고리즘에 사용될 range-bin의 개수를 줄여보았다. 그 결과, 선택 가능한 최소 range-bin의 수는 레이더 해상도 즉, 대역폭과 직접적인 관련이 있다는 것을 확인하였다. 대역폭이 넓은 광대역 레이더일 경우에는 선택된  $n$ 개의 range-bin에 포함된 에너지와 전체 에너지와의 비  $\gamma$ 의 값이 작도록  $n$ 을 선택하여 SSA 알고리즘을 실행해 주어도 영상의 품질에 큰 영향 없이 계산시간을 90 % 이상 줄일 수 있는 반면에, 대역폭이 좁은 협대역 레이더인 경우에는 보다 큰  $\gamma$  값을 갖도록 range-bin의 수  $n$  선택해서 SSA 알고리즘을 실행해 주어야 영상의 품질에 큰 영향 없이 계산시간을 크게 줄일 수 있다. 다양한 실험 결과, 설정된 레이더의 대역폭에 따라 변하긴 하지만,  $\gamma$  값이  $80 \pm 10(\%)$ 이 되도록  $n$ 을 설정하면, 전체의 range-bin을 이용해서 SSA 수행 후 ISAR 영상을 얻었을 때와 비교해 유사한 영상품질을 획득할 수 있으며 특히 광대역 레이더를 이용한 경우에는 계산시간도 약 90 % 이상 단축시킬 수 있다.

참 고 문 헌

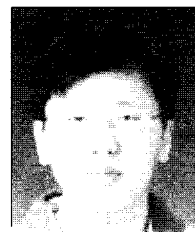
[1] Dean L. Mensa, *High Resolution Radar Cross-section Imaging*, Norwood, MA: Artech House, 1991.  
 [2] A. Zyweck, R. E. Bogner, "High-resolution radar imagery of the Mirage III aircraft", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, pp. 1356-1360, Sep. 1994.  
 [3] S. Musman, D. Kerm, and C. Bachmann, "Automatic recognition of ISAR ship images", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, pp. 1392-1404, Oct. 1996.  
 [4] J. Tang, Z. Zhu, "Comparison study on high resolution radar target recognition", *Proceeding of the IEEE 1996 National*, vol. 1, 1996.  
 [5] Donald R. Wehner, *High-Resolution Radar*, 2nd Edition, Artech House Inc.  
 [6] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction", *Journal of Optical Society of America*, pp. 116-130, Jan. 1962.  
 [7] Li Xi, Liu Guosui, and Jinlin Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, issue 4, pp. 1240-1252, Oct. 1999.

배 준 우



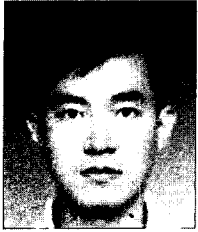
2005년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2005년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 패턴인식

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 1999년 3월~2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구조교수  
 2002년 3월~2004년 3월: 영남대학교 전자정보공학부 전임강사  
 2004년 4월~현재: 영남대학교 전자정보공학부 조교수  
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 어레이 신호처리, 패턴인식

이 진 호



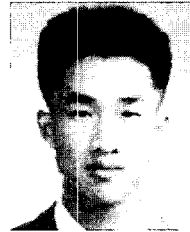
1990년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)

1992년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)

1992년 9월~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원

[주 관심분야] 위성시스템 설계, 위성 운용 & 시험, 광패턴인식

임 정 흠



1999년 2월: 전북대학교 제어계측공학과 (공학사)

2001년 2월: 전북대학교 제어계측공학과 (공학석사)

2000년 12월~2005년 2월: 한국항공우주연구원 연구원

2005년 3월~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원

[주 관심분야] 위성 및 발사체 접속, 위성제어시스템