

PGA(Phase Gradient Autofocus)기반 ISAR영상 자동초점기법 성능개선

김관성^{*,1)} · 양은정¹⁾ · 김찬홍¹⁾ · 박성철¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

Improvement of ISAR Autofocusing Performance Based on PGA

Kwan Sung Kim^{*,1)} · Eun Jung Yang¹⁾ · Chan Hong Kim¹⁾ · Sung Chul Park¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 12 May 2014 / Revised 15 August 2014 / Accepted 19 September 2014)

ABSTRACT

PGA(phase gradient autofocus) has been widely used to remove motion induced phase errors in the ISAR(inverse synthetic aperture radar) imaging. The critical process for the processing time and image quality is windowing stage in PGA. In this paper, the new method to determine window size based on polynomial least square approximation is proposed. Moreover, dominant range bins are selected for efficient phase error estimation, which improve image quality and speed up convergence. The simulation results show that the proposed algorithm provides high quality ISAR images while computational efficiency of inherent PGA is retained.

Key Words : ISAR(역 합성 개구 레이더), Phase Gradient Autofocus(위상각 기울기 자동초점), Non-Cooperative Target Recognition(비협조적 표적 식별), Scatterer(산란점)

1. 서론

ISAR 영상은 비협조적 표적인식(NCTR)의 중요한 수단으로 사용되어져왔다. ISAR 영상은 거리 프로파일(range profile) 형태의 1차원 신호보다 많은 정보를 포함하고 있고, 표적을 인식하는데 있어 많은 특징 점들을 제공한다. 하지만 데이터를 수신하는 동안 표적이 이동하기 때문에(translational motion) 시변(time-varying)

도플러 변이를 발생시키고, ISAR 영상이 흐려지는 문제가 발생된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 수신한 데이터의 위상 보정을 통해 표적이동에 의한 위상 오차를 송신 파장 이하로 보정해주는 과정이 필요하다. 거리 보정 방법은 parametric 접근방법^{[1~3])}과 non-parametric 접근방법^{[4~6])}으로 나눌 수 있는데, parametric 접근방법은 표적이동에 의해 발생한 위상오차를 속도 및 가속도등의 parameter를 바탕으로 다항 함수로 모델링한다. 영상의 초점 수준을 개량할 수단(contrast, entropy)을 적용하여 원하는 수준으로 초점화 될 때까지 parameter 추정을 반복 수행하여 위상 오차를 보정

* Corresponding author, E-mail: kings.add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

한다. 이 방법은 낮은 SNR의 신호나 강한 세기의 클러터에도 좋은 영상을 얻기 위해서는 유리할 수 있으나 표적의 움직임이 가정한 모델에 맞지 않으면 적용하기 힘들 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서는 추적레이더가 대공표적을 추적하는 중에 NCTR을 위해 ISAR 영상을 얻는 환경을 가정하므로 SNR이 충분하다고 판단할 수 있고 클러터의 영향은 적다. 이러한 환경에서는 대공표적의 어떠한 기동모델도 가정하지 않아도 되는 non-parametric 방법이 parametric 방법보다 적합하다. Non-parametric 위상보정 기법으로는 대표적으로 PPP(Prominant Point Processing)^[4,5], PGA(Phase Gradient Autofocus)^[6] 방식이 있다. PPP 방식은 계산량 측면에서는 아주 효과적이나, 성능이 지배적인(dominant) 산란점에 의존적이므로 제한된 조건에서만 적용 가능하다는 단점이 있다. 반면, SSA(Stage by Stage Algorithm)기법을 이용한 엔트로피 최소화방법^[2]은 비교적 잘 초점이 맞춰진 영상을 얻을 수 있으나, 많은 반복수행으로 인해 실시간성을 보장할 수 없다. 이에 반해 PGA 기법은 PPP처럼 까다로운 조건의 지배적인 산란점이 필요하지 않으면서 일정 수 이하의 반복 수행만을 통해 좋은 영상을 얻을 수 있기 때문에 SAR 및 ISAR 분야에 널리 이용되고 있다.

본 논문에서는 기존 PGA 알고리즘을 기반으로 영상의 질을 개선하면서 연산시간을 효율적으로 줄이는 알고리즘을 제안한다. 윈도우 선정 시 다항식 최소자승 근사법을 적용하여 알고리즘 연산시간을 줄이고, 효율적인 위상오차 추정을 위하여 강인한 거리셀들을 선별하는 알고리즘을 적용한다. 본 논문의 2절에서는 ISAR 영상을 형성하는 전반적인 과정에 대해 설명하고, 3절에서는 기존 PGA 알고리즘에 대해 살펴본다. 4절에서는 제안하는 알고리즘에 대해 기술하며, 5절에서는 제안한 방법의 성능을 기존 PGA방법과 SSA방식을 이용한 엔트로피 최소화 방법과의 비교분석을 통해 입증한다.

2. ISAR 영상형성

이번 절에서는 레이더가 고정인 상태에서 움직이는 표적의 레이더 영상을 획득하는 과정인 ISAR 영상획득에 대해 간단히 살펴본다. 일반적으로 Fig. 1과 같이 레이더와 표적의 2차원적인 관계를 고려했을 때 시간

t인 시점에 레이더 안테나와 (x, y)에 위치한 산란점 사이의 거리는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$r(t) = R(t) + x\cos(\theta(t)) - y\sin(\theta(t)) \quad (1)$$

여기에서 R(t)는 레이더와 표적의 회전중심부의 거리, $\theta(t)$ 는 RLOS(Radar Line Of Sight) 방향 축(U)으로 부터의 회전각이다. 표적 산란점 (x, y)에 맞고 반사되어 돌아오는 기저대역 수신신호는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$s(f, t) = \sigma(x, y)\exp(-j2\pi f \frac{2r(t)}{c}) \quad (2)$$

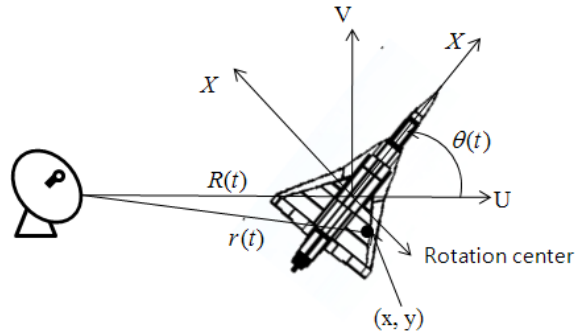


Fig. 1. Geometry of radar image of moving target

여기에서 f는 송신주파수이고 $\sigma(x, y)$ 는 표적 산란점의 복소 반사함수(complex reflectivity function)이며, c는 빛의 속도이다. 그러므로 표적의 신호는 표적을 구성하고 있는 모든 산란점들의 수신신호를 아래 식과 같이 적분하면 얻을 수 있다.

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x, y)\exp(-j2\pi f \frac{2r(t)}{c})dxdy \quad (3)$$

식 (1)을 이용하여 식 (3)을 다시 전개하면 식 (4)와 같이 표적의 수신신호가 표현될 수 있다.

$$S(f, t) = \exp[-j4\pi f R(t)/c] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x, y)\exp[-j2\pi(xf_x - yf_y)]dxdy \quad (4)$$

여기에서 $f_x = 2f\cos(\theta(t))/c$, $f_y = 2f\sin(\theta(t))/c$ 이다. 식 (4)의 $\exp[-4\pi f R(t)/c]$ 부분이 표적 이동에

의해 발생한 위상 성분으로, $R(t)$ 값을 정확히 예측한다면 위상 성분을 보상할 수 있다. Parametric 방식은 가령 $R(t) = \sum_{k=0}^K \alpha_k t^k$ 와 같이 신호의 움직임을 다항식으로 모델링하여 α_k parameter들을 추정하는 방식인 반면, non-parametric 방식은 모델링 없이 버스트 별 위상 자체를 추정 및 보상한다. 표적의 이동 보상을 고려한 전체 ISAR 영상형성 과정은 Fig. 2와 같다. 측정된 신호의 데이터행렬 $S(m,n)$ 는 $M \times N$ 복수행렬로 구성되며, $m = 0, \dots, M - 1, n = 0, \dots, N - 1$ 이고, m 은 버스트 방향 시간 인덱스, M 은 수신신호의 버스트 개수, n 은 거리방향 주파수 인덱스, N 은 각 수신신호의 주파수영역 샘플개수이다. 이 수신신호를 주파수방향으로 역 푸리에 변환을 하면 압축된 거리방향 신호를 얻을 수 있다. 표적의 속도가 빠른 경우에는 속도성분에 의해서 펄스 간에도 위상변화가 생기게 되므로 펄스 간 이동보상기법을 이용하여 보상해 주어야 한다. 또한 관찰하는 시간 동안 표적이 이동하므로 산란점들이 초기의 거리셀에 머물러 있을 수 있도록 수신신호마다 거리셀 위치를 보정하는 거리정렬(range alignment) 과정이 필요하다. 본 논문에서 펄스 간 이동보상기법은 엔트로피 최소화 기법^[2]을 이용하여 구현하고, 거리정렬 기법은 엔트로피를 최소화하는 ARP(Average Range Profile) 기법^[7]을 적용하였다.

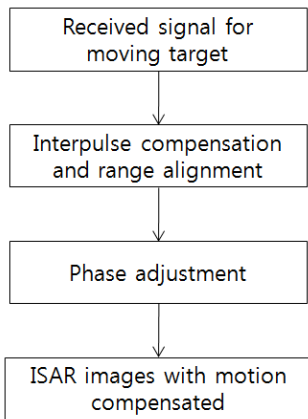


Fig. 2. Procedure for ISAR imaging

거리정렬까지 수행하면 모든 산란점들은 본래의 거리셀 속에 위치한다고 간주할 수 있으나 여전히 남아 있는 잔여 위상오차를 제거하여야 왜곡이 없는 영상을 얻을 수 있다. 이 잔여 위상오차를 보정하는 부분

은 Fig. 2의 위상보정(phase adjustment) 부분을 통해서 이루어지는데 본 논문에서는 위상 보정을 위한 알고리즘에 초점을 맞추었다. 위상보정까지 된 데이터를 버스트방향으로 푸리에 변환을 수행하면 원하는 최종 영상을 얻을 수 있다.

3. PGA 알고리즘

PGA 기법은 이미 SAR 및 ISAR 영상형성에 보편적으로 많이 이용되는 기법이다. PGA의 기본적인 개념은 위상오차로 인해 초점이 맞지 않는 원본 영상으로부터 위상오차의 미분치를 추정하고, 이를 적분하여 보정해야 할 위상성분을 구하는 것이다. 일반적으로 PGA알고리즘은 회전천이(Circular Shift), 윈도우적용(Windowing), 위상 기울기각 추정, 위상보정 및 반복수행의 4단계의 과정을 통해 수행된다. 본 절에서는 각 단계에서 어떤 과정을 수행하며 기존 PGA 방법에서 단계별로 발생할 수 있는 문제점에 대해 기술한다.

3.1 회전 천이(Circular Shifting)

우선 펄스간 이동보상 및 거리정렬을 수행한 데이터를 받아 버스트방향으로 이산푸리에 변환(DFT)을 수행한다. 이 데이터에서 각 거리 셀에 대하여, 신호의 크기가 가장 큰 도플러 셀을 찾아 도플러 주파수 영(0)의 위치로 회전 천이한다. 이 과정을 통해서 표적의 이동과 관련된 선형 위상 성분(도플러)을 제거하는 한편, 알고자하는 위상오차 정보는 유지할 수 있다.

3.2 윈도우 적용(Windowing)

회전 천이 과정을 통해 얻어진 데이터는 도플러 주파수 영의 위치를 중심으로 위상오차 추정을 위한 중요 정보들이 모여 있게 된다. 그러므로 적절한 윈도우를 사용하여 불필요한 도플러 영역의 정보들을 제거하는 과정이 필요하다. 이 때, 윈도우의 크기에 따라서 알고리즘의 성능과 복잡도가 영향을 받으므로, 윈도우의 크기를 정하는 것은 중요한 과제이다. 가장 단순하게, 윈도우 크기를 최대 크기에서 점차적으로 일정한 비율로 줄여나가는 방법이 있는데, 이는 영상이 커짐에 따라 수행시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

일반적으로 윈도우의 크기를 정하는 방법은 회전 천이된 데이터 $C(i,n), i = 0 \dots M - 1$ 를 아래 식과 같이 거리 방향으로 모두 더하여 얻은 $S(i)$ 을 이용

한다. 이 때 i 는 버스트 방향 도플러 빈 인덱스이다.

$$S(i) = \sum_{n=1}^N C(i,n) \quad (5)$$

여기서 N 은 총 거리 셀 수이다. 대개 자동으로 윈도우 크기를 구하는 방법은 최대치 $S(0)$ 값을 기준으로 α dB 아래를 threshold로 잡고, 이를 넘는 $S(i)$ 들을 구한다. 이렇게 구한 값들 중 주파수 영(0)을 중심으로 가장 멀리 떨어져 있는 $S(i)$ 의 i 값을 윈도우 크기 W 로 정한다. 하지만 $S(i)$ 값이 i 에 대하여 부드러운 곡선이 아니라 들쭉날쭉하게 구성되어 있어 위의 방법을 사용하면 윈도우 크기가 상황에 따라 일관성 없이 변하게 된다. 이 때, 윈도우 크기가 적정한 크기보다 작아지면 위상오차 추정을 위한 중요한 정보를 손실하게 되고, 반면 윈도우 크기가 커지면 효율성이 떨어진다. 그러므로 적절한 윈도우 크기를 자동으로 구하는 과정은 꽤 까다로운 작업이 될 수 있다.

3.3 위상 기울기각(gradient) 추정

회전천이 및 윈도우적용 과정이 수행되면 그 데이터를 버스트방향으로 역 이산 푸리에변환(IDFT)을 수행한 후 버스트별 위상오차를 추정한다. 위상오차 추정을 위해 LUMV(Linear Unbiased Minimum Variance)^[8] 방법을 많이 이용하는데, LUMV 추정 방법으로 실제 보상해야할 위상성분을 구할 수 있다. 하지만 여기에는 오차들이 많이 포함되어 있고, 이러한 오차들은 회전천이 및 윈도우적용 과정을 반복 수행함으로써 점차 줄어든다.

3.4 위상보정 및 반복수행

위상 기울기각 추정 및 적분을 통해 구해진 각 버스트별 보정위상을 $\hat{\phi}(m)$ 이라 하고 최종 회전천이 및 윈도우적용과정을 끝낸 데이터를 $G_f(m,n)$ 라 하면, 아래 식과 같이 보정위상을 곱하여 최종 보상된 데이터를 얻는다.

$$G'(m,n) = G_f(m,n) \times \exp(-j\hat{\phi}(m)) \quad (6)$$

이렇게 얻은 데이터를 기반으로 앞에서 언급한, 회전천이부터 각 단계를 위상오차가 일정 범위 안에 들어올 때 까지 반복한다.

4. PGA 알고리즘 개선

전통적인 PGA 알고리즘에서는 앞 절에서 설명한4 단계를 반복적으로 수행함으로 실시간 고속처리가 필요한 시스템에는 다소 시간 소모가 많이 발생한다. 그러므로 본 절에는 선택적으로 거리 셀을 선별하고 적절한 윈도우 크기를 정하여, 영상의 질은 향상시키고 처리시간을 줄이는 방법에 대해 제안한다. 알고리즘의 전체적인 구성은 Fig. 3과 같다.

4.1 개선된 윈도우크기 설정방법

윈도우 적용 시, 윈도우 크기를 너무 조밀한 간격으로 줄여 가면 엔트로피 값이 커지고 작아짐을 반복하기 때문에 최소 엔트로피를 찾기 위해서 윈도우의 크기가 아주 작을 때까지 반복 수행하여야 한다. 이 때문에 반복 수행 횟수가 증가하고 이와 더불어 위상보정에 많은 시간이 소요된다. 반면, 너무 넓은 간격으로 윈도우 크기를 줄여나가면 어느 순간 필요한 정보를 잃어버려 영상의 질이 저하될 우려가 있다. PGA 알고리즘에서 윈도우 크기를 선정하고 적용하는 과정이 성능과 속도 측면에서 가장 중요한 과정이라고 할 수 있다.

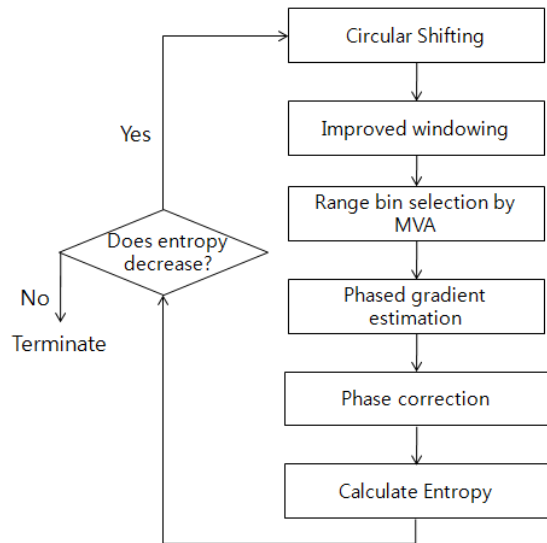


Fig. 3. Procedure of proposed PGA method

일반적으로, 식 (5)와 같이 구해진 1차원 데이터인 $S(i)$ 를 이용하여 윈도우의 초기 크기를 선정하고, 반

복수행 마다 윈도우 크기를 점차 줄여 간다. 하지만 Fig. 4에서 점선 원(dashed circle)으로 표시된 부분을 보듯이 $S(i)$ 값은 요동(fluctuation)이 많아서 적절한 임계치를 적용하여 위치를 잡기가 힘들다. 이를 해결하기 위해서, 본 논문에서는 $S(i)$ 을 다항식으로 근사하여 자동으로 윈도우 크기를 정하는 방법을 제안하였다. 우선 $S(i)$ 를 다항식 최소자승 근사법(polynomial least square approximation)을 이용하여 근사화하면 그림 Fig. 4에서와 같이 부드러운 곡선 형태의 함수를 얻을 수 있다. 그림에서는 5차 다항식으로 근사화하였다. 제안한 알고리즘에서는 요동이 심한 $S(i)$ 대신 근사화한 함수를 이용하여 윈도우 크기를 구한다. 제안한 알고리즘에서는 위상 오차 추정을 위한 정보의 양이 $S(i)$ 로 표현된 크기와 비례한다는 가정을 바탕으로 윈도우 크기를 결정 하였다. 근사화한 함수를 도플러 0을 중심으로 0에서부터 양의 방향(+)으로 적분하여 그 값이 전체 에너지의 일정 비율이 되도록 하는 i 를 W_R 로 두고, 반대로 0에서부터 음의방향(-)으로 적분하여 그 값이 전체 에너지의 일정 비율이 되도록 하는 i 를 W_L 로 둔다.

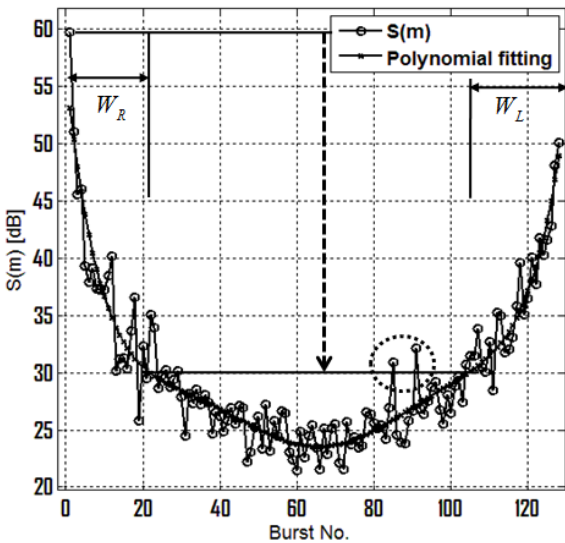


Fig. 4. Polynomial fitting of $S(m)$ to select window width

여기서 구한 값 중 더 큰 값을 최종 윈도우크기로 정한다.

$$W = \max(W_L, W_R) \tag{9}$$

4.2 강인한 거리셀 선택방법

위상오차 추정 시 필요한 정보는 모든 거리 셀에 고루 분포하는 것이 아니라, 산란점들이 존재하는 특정 거리 셀에 집중되어 있다. 만일 이러한 거리 셀만을 선택하여 추정에 사용할 수 있다면, 더 정확한 위상추정을 할 수 있다는 사실들이 알려져 있다⁹⁾. 거리 셀을 선택할 때, 최대 에너지를 기준으로 하거나 최소분산(minimum variance)을 기준으로 거리 셀을 선택할 수 있고, 혹은 두 방법을 혼성할 수도 있다. 본 논문에서의 ISAR 영상은 주로 항공기표적이 대상이고, 추적레이더를 통해 표적을 안정적으로 추적하고 있으며, 관찰시간이 1초 이내인 경우를 가정한다. 이러한 환경에서는 모든 버스트 간에 원하는 산란점들이 안정성 있게 존재해야하므로 최소분산 기준으로 거리 셀을 선택하였다. 윈도우 적용 후 버스트방향으로 역 푸리에 변환하여 시간영역으로 만든 데이터를 $\hat{G}(m, n)$ 이라 하고, 식 (7)과 같이 거리셀 마다 평균전력으로 정규화한 분산을 구한다.

$$\sigma^2(n) = \frac{V_m(|\hat{G}(m, n)|)}{E_m(|\hat{G}(m, n)|)^2} \tag{7}$$

여기에서 $V_m(\cdot)$, $E_m(\cdot)$ 은 버스트방향(m)으로의 분산과 평균을 의미한다. 얻어진 $\sigma^2(n)$ 을 미리 정해 놓은 문턱치와 비교하여 값이 문턱치 이하인 셀들을 선택하고, 이렇게 선택된 셀들만을 이용하여 위상 오차를 구한다.

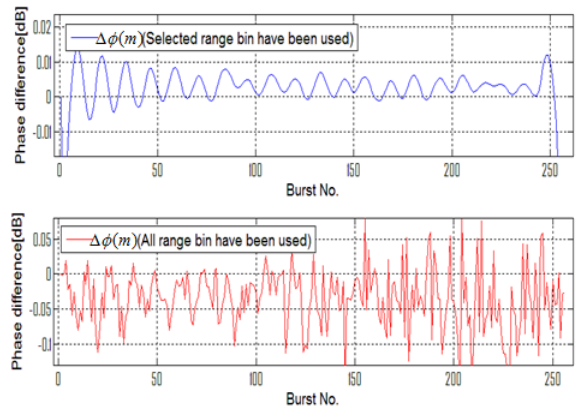


Fig. 5. Comparison of estimated phase error on 4th iteration

Fig. 5는 특정한 거리 셀을 선택하여 위상오차를 추정하는 것이 얼마나 효과적인지 보여준다. 반복수행 4단계에서의 버스트간 위상오차 추정 결과 ($\Delta\phi(m)$)로 최소분산 기준으로 선택된 거리셀을 이용한 경우와 모든 거리셀을 이용한 경우를 비교하였다. 반복수행단계가 계속 진행될수록 고주파 성분들은 제거되고, 저차항의 저주파 성분들이 얻어지는데 선택된 거리 셀만을 이용하는 경우가 같은 단계에서 더 빨리 저차항의 함수로 수렴되는 것을 알 수 있다.

4.3 엔트로피 비교를 통한 반복수행

결국 얻고자하는 ISAR 영상을 정량적으로 측정하는 방법들은 여러 가지가 있을 수 있지만, 최근에 일반적으로 엔트로피 값[2]을 이용하여 형성된 영상이 얼마나 잘 초점화 되었는지를 판단한다. 그러므로 Fig. 3에서 보듯이 반복수행시에 각 단계별 추정된 위상오차를 보정하여 엔트로피를 구한 후 이 엔트로피가 증가하거나 윈도우 크기가 너무 작아지면 반복 수행을 멈춘다.

5. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 Fig. 6과 같이 2차원 형태의 인위적인 산란점 모델을 만들고 기하회절 이론(GTD : Geometrical Theory of Diffraction)모델에 기반하여 수신신호를 생성해서 시뮬레이션 입력 값으로 사용한다. 산란점 모델은 24개의 산란점으로 구성되어 있으며 표적의 크기는 가로 20, 세로 18m이다. 모든 시뮬레이션은 Matlab을 이용하였으며 Intel Core i5 3.3GHz CPU를 가진 PC에서 수행되었다. 시뮬레이션을 위해 이용한 레이더 파라미터는 Table 1과 같다.

Fig. 7은 서로 다른 3가지의 위상보정 기법을 적용한 ISAR 영상을 보여준다. 표적의 이동 시나리오는 거리 21km, 속도 110m/s, 가속도 1g, SNR 16dB의 값으로 이차항의 거리함수로 이동을 모사하였다. 위상보정을 하기 전에 펄스간 보정은 엔트로피 최소화방식을 적용하고, 거리정렬은 ARP 기법을 적용하였다. 그리고 그림에서 (a)는 전통적인 PGA기법을 이용하여 자동초점을 맞춘 결과이며 윈도우크기는 점차적으로 5%씩 줄여나갔으며, 위상추정을 위해 모든 거리셀을 이용하였다. (b)는 제안한 방법을 적용한 결과이며, (c)는 SSA방식

을 이용한 엔트로피 최소화기법을 적용한 결과이다. 그림을 보면 제안한 방법이 기존의 PGA기법보다 산란점들이 더 초점이 맞춰진 경향을 보이며 수행시간 또한 2배 이상 빠르다는 것을 알 수 있다. 제안한 방법과 SSA 방식의 최종 영상 엔트로피는 유사하나 SSA 방식의 수행시간은 100초 이상으로 실시간으로 운영해야 하는 레이더 시스템에 적용하기는 힘들 것으로 판단된다.

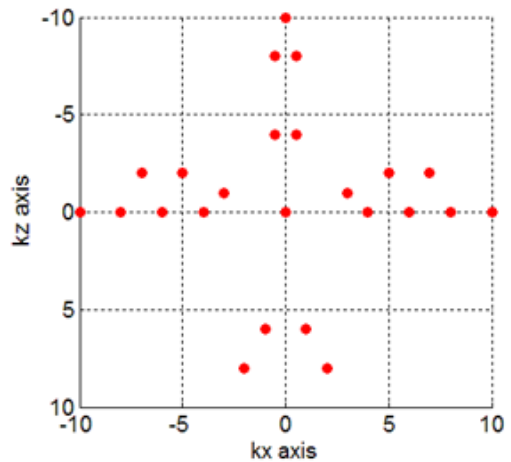
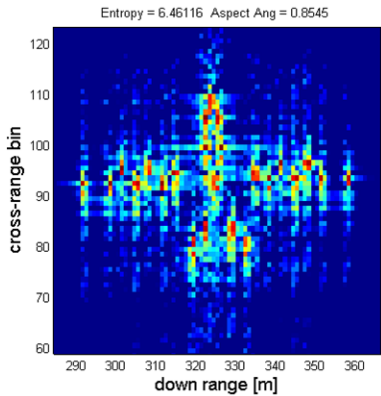


Fig. 6. Target configuration composed of 24 point-scatterers

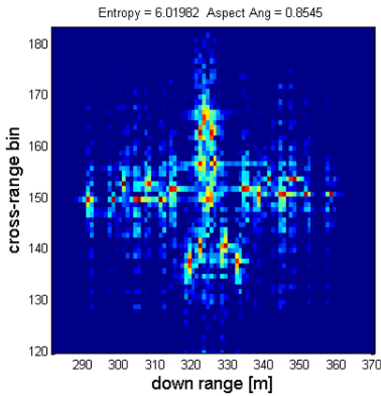
Table 1. Radar parameters for simulation

| Waveform | SFW |
|-------------------|--------|
| Bandwidth | 500Mhz |
| Carrier Frequency | Xband |
| Frequency Step | 1Mhz |
| PRF | 50kHz |
| No. of pulses | 501 |
| No. of Bursts | 256 |

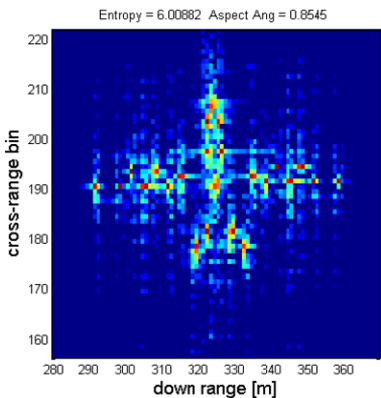
Fig. 8, Fig. 9는 Fig.7에서와 같은 시나리오 상황에서 입력 SNR을 10dB에서 30dB까지 변화시키면서 각 위상보정 방법마다 화이트 가우시안 잡음(WGN)을 이용하여 각 30회의 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 엔트로피, 콘트라스트(Contrast) 그리고 수행시간을 측정하여 그 결과를 평균하여 도시하였다.



(a) Conventional PGA :
entropy = 6.46 run time = 3.86sec



(b) Proposed Method :
entropy = 6.02, run time = 1.5sec



(c) Entropy minimization with SSA :
entropy = 6.0, run time = 137sec

Fig. 7. ISAR images after phase adjustment

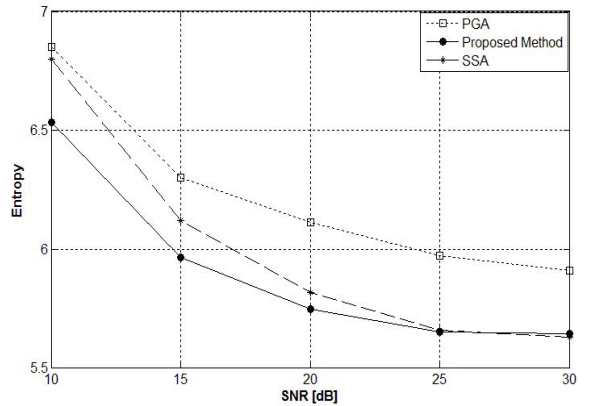


Fig. 8. Entropy comparison of autofocusing methods corresponding to SNR

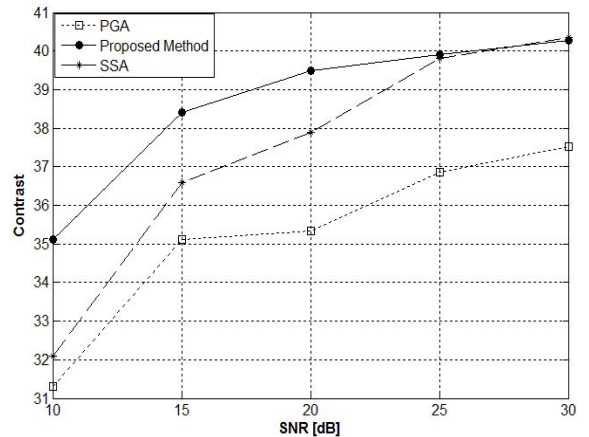


Fig. 9. Contrast comparison of autofocusing methods corresponding to SNR

Table 2. Processing time comparison of autofocusing methods

| | PGA | SSA | Proposed Method |
|------------|-------|--------|-----------------|
| time(mean) | 3.72s | 118.7s | 1.12s |
| time(std.) | 0.02s | 1.71s | 0.03s |

먼저 Fig. 8의 엔트로피 결과를 보면 제안한 방법이 전반적으로 우수한 성능을 보이며 SNR이 커질수록 SSA 방식과 그 성능이 유사하거나 좀 더 좋은 결과를 보이고, 전통적인 PGA방법보다는 확실히 초점이 더

맞춰진 영상을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 9의 콘트라스트 비교에서는 높은 값이 나올수록 좀 더 초점이 맞춰진 것을 의미하며, 제안한 방법이 전반적으로 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. Table 2의 수행시간 측정결과를 살펴보면 SSA 방식은 지나치게 수행시간이 많이 걸리며 수행시간의 편차가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 그에 반해 PGA방법과 제안한 방법은 비교적 수행시간이 빠르고 수행시간의 편차가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이 부분은 실시간처리를 위한 시스템에서는 중요하게 고려해야 할 사항이다. 수행시간이 편차가 많다면 실시간처리를 위한 하드웨어 설계는 최대 처리시간에 맞춰서 설계해야하기 때문에 비용 면에서 비효율적이라 할 수 있다. 제안한 방법이 기존 PGA방법보다 2배 이상 빠른 처리시간을 보이며 영상의 품질 및 처리시간에서 보다 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문은 표적의 이동성분(translational motion)에 의해 흐려진 ISAR영상의 품질을 높이면서 효율적인 연산을 통해 처리시간을 단축하는 방법에 대해 기술하였다. 다항식 최소자승 근사법을 이용하여 윈도우 적용시 적절한 윈도우 크기를 결정하여 저주파의 위상정보를 잃어버리지 않고 고주파의 잡음을 필터링할 수 있게 하였으며, 강인한 산란점이 있는 거리 셀들을 선택적으로 위상오차 추정에 이용함으로써 시간을 줄이면서 원하는 고품질의 ISAR영상을 얻을 수 있었다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안한 방법을 기존 PGA방법과 SSA방식과의 성능비교를 통해 제안한 방법의 우수성을 입증하였다.

References

- [1] F. Berizzi, G. Corsini, "Focusing of Two Dimensional ISAR Images of Objects by Contrast Maximization," Proceedings of Microwave Conference, Helsinki, Finland., pp. 951-956, August, 1992.
- [2] L. Xi, L. Giosui, J. Ni, "Autofocusing of ISAR Images Based on Entropy Minimisation," IEEE TR. On Aerospace and Electronic Systems, Vol. 35, No. 4, pp. 1240-1252, October 1999.
- [3] J. Li, R. Wu, V. C. Chen, "Robust Autofocus Algorithm for ISAR Imaging of Moving Targets," IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-37, No. 7, pp. 1091-1099, July 2001.
- [4] B. D. Sleinberg, "Radar Imaging from a Distorted Array: The Radio Camera Algorithm and Experiments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-29, No. 5, pp. 740-748, September 1981.
- [5] B. Haywood, R. J. Evans, "Motion Compensation for ISAR Imaging," Proceedings of ASSPA 89, Adelaide, Australia, pp. 113-117, April 1989.
- [6] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, C. V. Jakowatz, Jr, "Phase Gradient Autofocus-A Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, Vol. 30, No. 3, pp. 827-835, July 1994.
- [7] D. Zhu, L. Wang, Q. Tao, and Z. Zhu, "ISAR Range Alignment by Minimizing the Entropy of the Average Range Profile," in Proc. IEEE Radar Conf., Verona, NY, pp. 813-818, Apr. 2006.
- [8] P. Eichel, C. Jakowatz, Jr, "Phase-Gradient Algorithm as an Optimal Estimator of the Phase Derivative," Optics Letters, 14,20(Oct, 1989).
- [9] W. Nel, E. Giusti, "A Time Domain Phase-Gradient Based ISAR Autofocus Algorithm", IEEE CIE Internation Conf. Chengdu, pp. 541-544, Oct. 2011.