

부배열 평균과 엔트로피 최소화 기법을 이용한
stepped-frequency ISAR 자동초점 기법 성능 향상 연구
Application of Subarray Averaging and Entropy
Minimization Algorithm to Stepped-Frequency ISAR
Autofocus

정호령, 김경태*, 이동한, 서두친, 송정현, 최명진, 임효숙
Ho-Ryung Jeong, Kyung-Tae Kim*, Dong-han Lee, Du-chun Seo,
Jeong-heon Song, Myung-jin Choi, Hyo-suk Lim
한국항공우주연구원, 영남대학교*
sar@kari.re.kr, juniorf@ynu.ac.kr*, dhlee@kari.re.kr, dcivil@kari.re.kr,
newssong@kari.re.kr, prime@kari.re.kr, hslim@kari.re.kr

abstract

In inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging, An ISAR autofocusing algorithm is essential to obtain well-focused ISAR images. Traditional methods have relied on the approximation that the phase error due to target motion is a function of the cross-range dimension only. However, in the stepped-frequency radar system, it tends to become a two-dimensional function of both down-range and cross-range, especially when target's movement is very fast and the pulse repetition frequency (PRF) is low.

In order to remove the phase error along down-range, this paper proposes a method called SAEM (subarray averaging and entropy minimization) [1] that uses a subarray averaging concept in conjunction with the entropy cost function in order to find target motion parameters, and a novel 2-D optimization technique with the inherent properties of the proposed entropy-based cost function. A well-focused ISAR image can be obtained from the combination of the proposed method and a traditional autofocus algorithm that removes the phase error along the cross-range dimension. The effectiveness of this method is illustrated and analyzed with simulated targets comprised of point scatters.

I. 서론

레이더는 제 2 차 세계 대전 이후 군에서 사용하는 가장 중요한 센서 중의 하나이다. 최근에는 기술의 급속한 발전으로 레이더를 이용하여 표적에 대한 영상을

제작할 수 있는 단계에 이르고 있다. 특히 레이더 영상의 경우 주야 및 날씨에 관계 없이 표적에 대한 영상을 획득할 수 있으므로 광학 영상의 문제점을 해결할 수 있는 중요한 도구가 된다 [2].

영상 레이더로서 대표적인 것은 합성 개구면 레이더인 SAR(synthetic aperture radar) 시스템이다. 이것은 넓은 지표면 영역에 대한 전장 정보를 획득하기 위하여 레이더를 항공기나 위성에 탑재하여 레이더 영상을 얻는 시스템을 말한다.

SAR 시스템과는 반대로 고정된 레이더를 사용하여 움직이는 표적에 대한 영상을 획득하는 영상 레이더를 ISAR 시스템이라 한다. 넓은 영역에 대한 레이더 영상을 제작하는 SAR 시스템과는 달리, ISAR 시스템을 사용하면 관심있는 표적에 대한 레이더 영상만을 얻게 된다. 선진국의 경우 지상의 추적레이더 시스템에 영상 레이더 모드를 장착하여 ISAR 시스템으로 운용하고 있다 [2].

ISAR 영상을 생성하기 위해서 사용되는 레이더 시스템은 1차원 레이더 신호를 얻기 위해서 어떠한 신호를 사용하는가에 따라 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째는 넓은 대역폭을 가지는 하나의 펄스 신호를 표적에 송신함으로써 1차원 레이더 신호를 얻는 chirp 레이더 시스템이 있으며, 두 번째는 서로 다른 중심주파수를 가지는 여러 개의 펄스 신호를 표적에 송신한 후 각각의 펄스로부터 얻어진 주파수 응답을 수신단에서 inverse fast Fourier transform (IFFT) 와 같은 방법으로 합성하여 1차원 레이더 신호를 얻어내는 stepped-frequency 레이더 시스템이 있다.

일반적으로 ISAR 영상을 만들 시에는 1차원 레이더 신호를 생성하는 동안 표적이 움직이지 않는다고 가정한 상황에서 ISAR 영상을 생성하게 된다. Chirp 신호를 이용하여 1차원 레이더 신호를 얻기 위해서 펄스폭이 짧은 하나의 신호만을 송신하기 때문에 펄스폭의 시간 동안 표적의 움직임을 무시할 수 있다. 하지만

stepped-frequency 신호를 사용할 경우 1차원 레이더 신호를 생성하기 위해 필요한 총 시간은 첫 번째 펄스를 송신한 시간과 마지막 펄스를 송신한 시간의 차가 되고, 이것은 일반적으로 펄스폭에 비해서 매우 긴 시간을 가진다. 따라서, 그 시간 동안 표적의 움직임에 의한 영향을 무시할 수 없게 되고 결과적으로 1차원 신호의 초점이 맞지 않는 현상이 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 높은 pulse repetition frequency (PRF)를 가지는 레이더 시스템을 사용하지만, 낮은 PRF를 가지는 레이더를 사용함으로써 얻을 수 있는 이득을 포기해야만 하는 단점이 있다.

그림 1은 각각의 신호를 사용할 경우 표적의 움직임이 레이더 신호에 미치는 영향을 보여주고 있다.

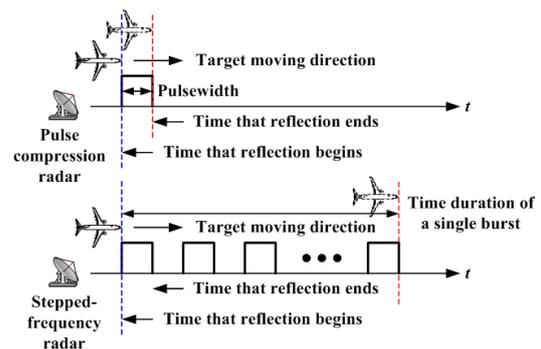


그림 1 표적의 움직임이 각 레이더 신호에 미치는 영향

Stepped-frequency 신호를 사용할 때 발생하는 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 SAEM(subarray averaging and entropy minimization) [1] 기법을 사용하였다. SAEM을 적용하여 최적화에 필요한 비용함수(cost function)를 정의하였다. 그리고 표적의 움직임을 보상하기 위해 필요한 표적의 속도와 가속도를 예측하기 위하여 속도-가속도 영역에서 SAEM으로 정의된 비용함수의 일반적인 특징을 이용

하고, 2차원 최적화 알고리즘 대신 1차원 최적화 알고리즘을 두 번 사용하는 새로운 최적화 기법을 도입하였다.

II. Stepped-frequency 신호를 이용한 2차원 ISAR 영상 신호 모델링
표적이 움직일 경우 stepped-frequency 신호는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$s(m,n) = \sum_{k=1}^K A_k \exp \left[-j \frac{4\pi f_n}{c} R(m,n) \right]$$

$$R(m,n) = r_{k0} + [v_R(m) - \hat{v}_R(m)] t_{m,n} + \frac{1}{2} [a_R(m) - \hat{a}_R(m)] t_{m,n}^2 \quad (1)$$

위 수식에서 $s(m,n)$ 은 표적의 움직임이 보상된 신호이다. 레이더는 원점에 위치하고 있다고 가정하였으며 m 은 burst 개수, n 은 한 burst에 포함된 펄스 개수, $t_{m,n}$ 은 m 번째 burst의 n 번째 펄스가 표적으로부터 반사되는 시간, f_n 은 n 번째 펄스의 중심 주파수, c 는 빛의 속도, K 는 표적을 구성하고 있는 산란점의 총 개수, k 는 각각의 산란점에 할당된 인덱스를 의미한다. A_k 와 r_{k0} 는 k 번째 산란점의 크기 및 line-of-sight(LOS) 상에서 산란점과 레이더 간의 거리를 의미하며, $v_R(m)$, $a_R(m)$, $\hat{v}_R(m)$, $\hat{a}_R(m)$ 은 각각 실제 표적의 속도 및 가속도와 예측한 표적의 속도 및 가속도를 의미한다. 영상의 초점을 흐려지게 하는 위상 오차는 $v_R(m)$ 과 $a_R(m)$ 에 의하여 발생하며, $\hat{v}_R(m)$ 과 $\hat{a}_R(m)$ 을 정확히 예측하여 $v_R(m)$ 과 $a_R(m)$ 를 제거하면 초점이 맞는 ISAR 영상을 생성할 수 있다.

III. SAEM을 이용한 1차원 레이더 신호의 재구성
부배열 평균 개념은 그림 2와 같이 하나의 burst안에 포함된 수신된 N 개의 펄스로부터 총 P 개의 부배열을 만들어내는 과정으로부터 시작한다. 인접한 부배열의 첫

번째 펄스 인덱스는 d 만큼의 차이가 있으며, 각 부배열은 동일한 L 의 길이를 갖는다.

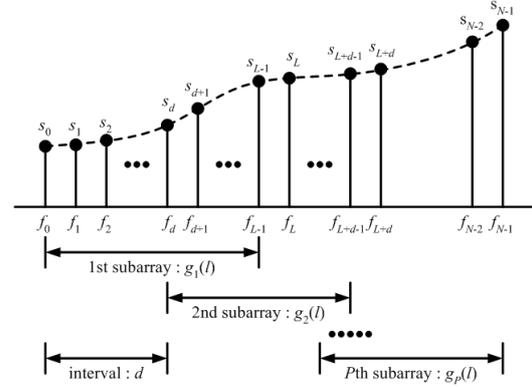


그림 2 부배열 개념

부배열 평균 개념을 도입한 새로운 엔트로피 비용함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I = - \sum_{l=0}^L \hat{h}(l) \ln \hat{h}(l), \quad \hat{h}(l) = \frac{\sum_{p=1}^P |g_p(l)|^2}{\sum_{p=1}^P \sum_{l=0}^{L-1} |g_p(l)|^2} \quad (2)$$

위 수식에서 $g_p(l)$ 은 $s(m,n)$ 으로부터 얻어진 p 번째 부배열로부터 IFFT 기법을 사용하여 만들어진 1차원 레이더 신호이다. 식 (2)로부터 얻어진 엔트로피 I 는 $\hat{v}_R(m)$ 과 $\hat{a}_R(m)$ 이 $v_R(m)$ 과 $a_R(m)$ 에 근접할수록 낮은 값을 가지므로 I 가 최소화되는 \hat{v}_R 과 \hat{a}_R 을 이용해서 위상 오차를 보상하면 초점이 맞는 ISAR 영상을 얻을 수 있다.

부배열 개념을 도입하지 않은 상태로 구한 \hat{v}_R - \hat{a}_R 영역 상에서의 I 분포와 부배열 개념을 도입하였을 경우의 I 분포는 그림 3과 4에 나타나 있다.

그림 3의 경우 \hat{v}_R - \hat{a}_R 영역상에서 수많은 local minimum 값들이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이 값들은 최적화 알고리즘을 적용해서 I 의 최소값을 구할 경우 많은 어려움을 유발시킨다. 반면, 부배열 평

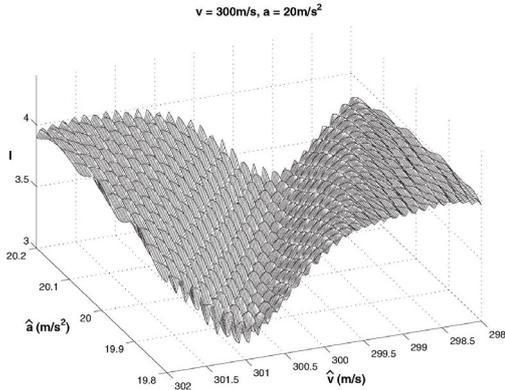


그림 3 부배열 개념을 도입하지 않았을 경우의 I 분포

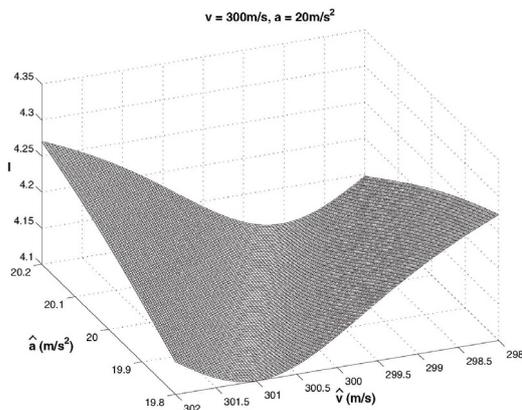


그림 4 부배열 개념을 도입하였을 경우의 I 분포

균 개념을 적용한 경우 (그림 4) local minimum 값들이 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

$\hat{v}_R - \hat{a}_R$ 영역상에서 I 의 최소값을 구하기 위해서는 2차원 최적화 알고리즘이 필요하다. 그러나 본 논문에서는 I 의 고유 분포 특성을 이용해서 두 번의 1차원 최적화 알고리즘을 적용함으로써 정확도의 손실 없이 계산량과 처리시간을 줄이면서 I 의 최소값을 구한다.

그림 5는 PRF가 변화할 경우 $\hat{v}_R - \hat{a}_R$ 영역상에서 I 의 분포를 나타낸 것이다. 그림 5를 보면 PRF가 변하더라도 최소값의 분

포는 기울기와 폭만 변화할 뿐, PRF와 무관하게 항상 일직선을 이룬다는 것을 알 수 있다.

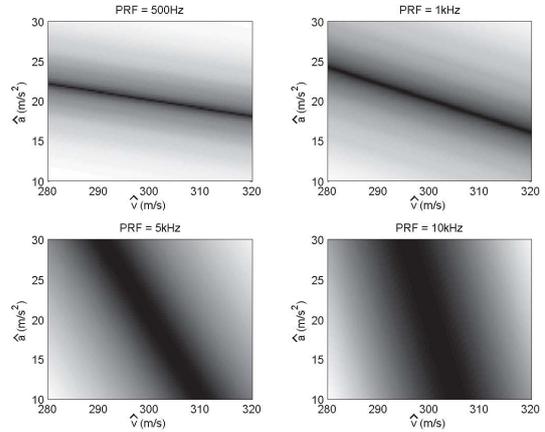


그림 5 PRF에 따른 I 분포의 변화

이러한 특징을 이용하여 그림 6과 같이 두 번의 1차원 최적화 알고리즘을 적용하여 I 의 최소값을 구한다.

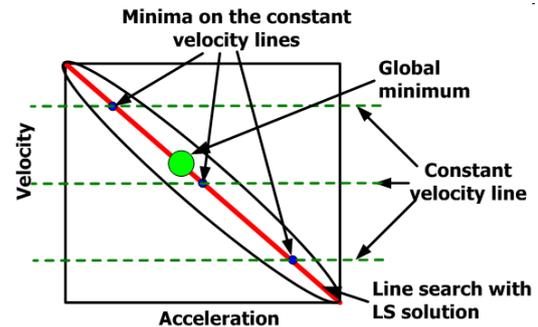


그림 6 최적화 알고리즘 적용 개념도

I 의 최소값을 찾기 위해서 먼저 동일한 속도(또는 가속도)를 가지는 선상에서 1차원 최적화 알고리즘을 수행한 뒤 각각의 최소값에 해당하는 (v, a) 좌표를 구한다. Least Square 최적화 기법을 이용하여 각 좌표를 연결하는 직선을 구한 뒤 그 직선상에서 I 의 최소값을 나타내는 (v, a) 를 표적의 속도와 가속도로 이용한다.

IV. SAEM을 이용한 ISAR autofocus SAEM을 이용한 ISAR autofocus는 크

계 두 가지 과정으로 나뉘어진다.

- ① SAEM을 적용하여 각각의 burst로부터 얻어진 1차원 레이더 신호에서 표적의 속도와 가속도에 의한 위상오차 제거
- ② 기존의 ISAR autofocus에 사용된 range alignment [3] 기법과 phase adjusment [4] 기법을 이용하여 초점이 맞는 ISAR 영상 생성

SAEM을 이용하여 위상오차를 제거할 경우 표적의 속도와 가속도만 고려하고 그 이상의 고차항에 대해서는 고려를 하지 않는다. 이는 한 burst time 동안 고차항에 해당하는 표적의 움직임에 의한 영향은 속도와 가속도에 의한 영향에 비교할 경우 상당히 작은 값을 가지기 때문이다. 이러한 개념은 그림 7에 설명되어져 있다.

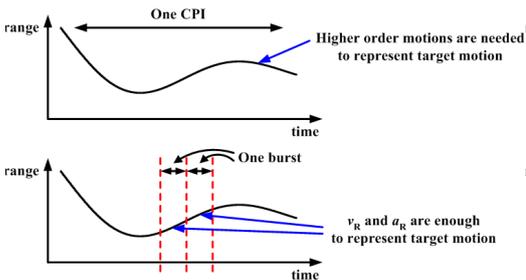


그림 7 시간의 폭이 변할 경우 표적의 움직임을 모델링하기 위해 필요한 표적 움직임 파라미터 개수의 변화

또한 ISAR 영상을 생성하기 위해 필요한 전체 coherent processing interval (CPI)에서 고차항에 의한 영향은 각 burst에서 예측한 속도와 가속도의 값이 조금씩 변하는 것으로 반영이 된다.

V. 실험 결과

ISAR autofocus 실험을 검증하기 위하여 사용된 산란점 모델은 그림 8과 같다.

SAEM의 1차원 레이더 신호의 복원 성능을 평가하기 위해 먼저 움직이는 표적

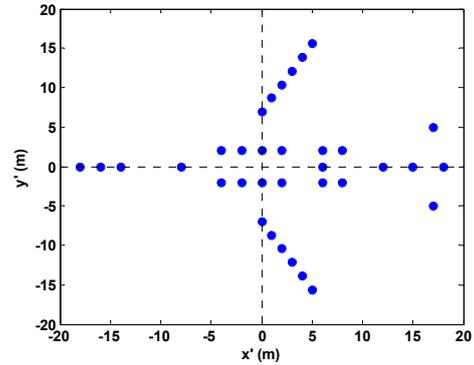


그림 8 산란점 모델

의 stepped-frequency 반사신호를 모델링하였다. 신호의 PRF, 시작 주파수, BW, M , N 은 각각 1kHz, 9GHz, 512MHz, 1, 256으로 가정하였다. SAEM 관련 파라미터들은 $L=128$ 과 $d=2$ 로 가정하였다. 또한 표적의 초기위치 좌표는 (20,0,15)km, 표적은 $+x$ 축선상으로 진행한다고 가정하였으며, 속도와 가속도는 각각 350m/s와 40m/s^2 로 가정하였다. 위 조건을 적용하고 신호대 잡음비(SNR)가 15dB라고 가정하였을 시 산란점 모델의 1차원 레이더 신호는 그림 9에 나타나 있다.

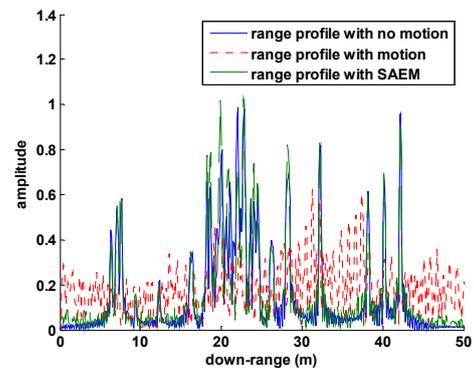


그림 9 표적의 움직임에 의한 위상 오차가 포함된 stepped-frequency 신호에 SAEM을 적용한 결과

그림 9에서 알 수 있듯이 위상 보상을 하지 않은 1차원 신호는 전체적으로 상당

히 퍼져 있는 반면, SAEM으로 위상 보상을 한 신호는 초점이 잘 맞으며 움직임이 없을 경우 생성한 신호와 모양이 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

그림 10과 11은 움직이는 표적으로부터 반사된 2차원 stepped-frequency 신호를 모델링 한 후 SAEM을 적용하지 않았을 경우(그림 10)와 적용한 경우(그림 11)의 ISAR 영상을 나타낸 것이다.

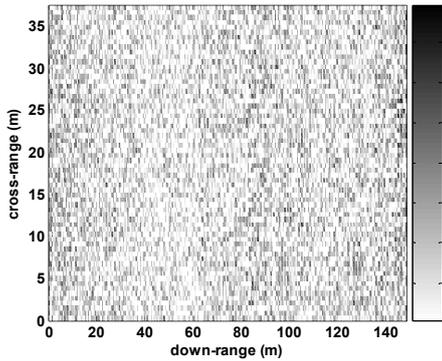


그림 10 SAEM을 적용하지 않은 ISAR 영상

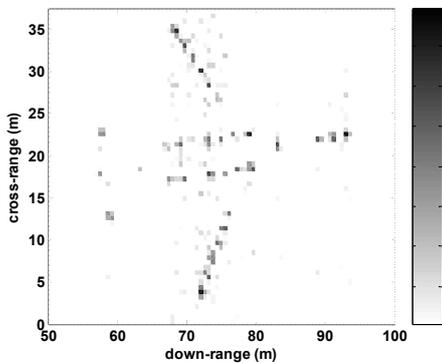


그림 11 SAEM을 적용한 ISAR 영상

레이더 관련 파라미터는 그림 9에 사용된 것과 거의 동일하며, $BW=256\text{MHz}$, $M=64$, $\text{SNR}=0\text{dB}$, 표적의 초기위치 $= (34.5, 0.5, 5)\text{km}$, 속도 및 가속도를 각각 400m/s 와 10m/s^2 으로 변화시킨 뒤 2차원 stepped-frequency 신호를 모델링하

였다. 각 ISAR 영상 픽셀값은 최대값을 1로 정규화한 후 dB값으로 변환되었다.

그림 10의 경우 표적의 외형은 전혀 관측되지 않으며 마치 잡음만 있는 영상처럼 보인다. 그러나 그림 11의 경우 그림 8에서 보여진 산란점 분포 형태가 그대로 나타나는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 SAEM을 기반으로 한 stepped-frequency ISAR autofocus 기법을 제시하였다. SAEM을 이용하여 낮은 PRF의 stepped-frequency 신호에서도 표적의 움직임에 의한 위상 오차를 보상하는 것이 가능하며, 표적이 매우 빠른 속도와 가속도로 움직일지라도 초점이 잘 맞는 ISAR 영상을 얻는 것이 가능하다.

V. 참고문헌

- [1] K.-T. Kim, "Reconstruction of high range resolution profiles of moving targets using stepped frequency waveforms," *Submitted to IET Radar, Sonar and Navigation*
- [2] 김경태, 정호령, "KOMSAR를 이용한 실제 항공기 ISAR 영상 제작" 한국전자과학회논문지 18(7), pp. 717-722, 2007년 7월.
- [3] G. Wang and Z. Bao, "The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation" *Proc. Conf. Radar '97, Edinburgh, UK*, pp. 39-45, Oct. 1998.
- [4] Li Xi, Liu Guosui, and Jinlin Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 35, issue 4, pp. 1240-1252, Oct. 1999..