

압축센싱 기반 처프 스케일링 알고리즘을 이용한 영상 형성 기법

문지완, 변정일, 박상욱, 조찬희, 최지훈
한국항공대학교 항공전자정보공학부

{answldhks, start2ji, tkddnr0318, j00c05h24}@kau.kr, jihoon@kau.ac.kr

Imaging Using Chirp Scaling Algorithm Based on Compressive Sensing

Jiwan Moon, Jeong-Il Byeon, Sangwook Park, Chanhee Jo, and Jihoon Choi
School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University

요약

본 논문에서는 합성 개구 레이더(SAR; Synthetic Aperture Radar)를 이용해서 획득한 원시 신호에 거리 및 방위방향으로 2 차원 압축센싱이 적용된 경우, 압축센싱 복원 알고리즘에 기반한 처프 스케일링 알고리즘(CSA; Chirp Scaling Algorithm)을 통해 영상을 생성하는 기법을 제안한다. 원시 신호로부터 SAR 영상을 형성하기 위해 CSA 를 사용하고, 압축센싱 복원 알고리즘의 연산 복잡도를 줄이기 위해 SAR 영상에 대응되는 원시 신호를 생성할 때 근사 관측 기법을 적용한다. 또한, 복원된 영상에 대응되는 원시 신호와 실제 측정된 원시 신호의 오차가 감소하는 방향으로 반복적으로 업데이트를 수행하여 영상을 형성한다. SAR 모델링 데이터와 실제 데이터에 제안된 기법을 적용하여 SAR 영상 복원 성능을 확인한다.

I. 서론

SAR 는 목표물과의 거리 및 상대 속도에 따라 레이더 반사 신호의 위상 및 주파수가 변하는 특성을 이용해서 날씨가 밤낮 조명에 상관없이 고해상도 이미지를 생성할 수 있다. 효율적인 이미지 생성을 위해 거리 및 방위방향으로 각각 주파수 영역에서 정합 필터링을 통해 초점 맞춤을 수행하는 거리 도플러 알고리즘(RDA; Range Doppler Algorithm)이 개발되었다. 또한, RDA 에서 RCMC(Range Cell Migration Correction)를 위한 보간 연산량을 줄이고, 스캔트 각도가 큰 환경에서 SRC(Secondary Range Compression)의 방위방향 주파수 의존성에 의한 영상 품질 저하를 극복하기 위한 방안으로 CSA 기법이 도입되었다. CSA 는 RCMC 를 위해 보간기를 사용하지 않고 시간 영역에서 위상 곱셈을 통해 신호를 보정한다 [1].

기존 SAR 영상 형성 기법은 나이퀴스트 주파수보다 높은 샘플링 주파수로 획득한 원시 데이터가 필요하므로 고해상도 이미지를 얻기 위해서는 넓은 대역폭이 필요하고 원시 데이터 저장 용량이 급격히 증가하는 문제가 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 랜덤 샘플링 기반 서브 나이퀴스트 샘플링과 압축센싱 복원 기법을 이용해서 SAR 영상을 생성하는 방안이 연구되어 왔다 [2]. 1 차원 압축센싱과 복원 기법을 적용하는 경우 센싱 행렬의 열벡터 수가 SAR 영상 픽셀 수에 비례해서 증가하므로 연산량이 과도하게 증가하는 문제가 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로 거리 및 방위방향으로 2 차원 랜덤 샘플링을 수행하고, 원시 데이터에 RDA 를 적용해서 SAR 영상을 생성하며, 근사 관측 기법을 이용해서 SAR 이미지에 대응되는 원시 데이터를 생성하고, ITA(Iterative Thresholding Algorithm)를 이용해서 압축센싱 복원을 수행하는 기법이 개발되었다 [3].

본 논문에서는 2 차원 압축센싱 복원 기법과 CSA 를 결합한 SAR 영상 생성 기법을 새롭게 제안한다. 제안된 기법은 원시 데이터를 2 차원 랜덤 샘플링으로 압축하고, 원시 데이터에 CSA 를 적용해서 SAR 이미지를 얻으며, 근사 관측에 기반한 ICSA(Inverse CSA)를 통해 SAR 이미지에 대응되는 원시 데이터를 계산하고, [4]의

DTCWT(Dual Tree Complex Wavelet Transform)와 결합된 ITA 를 통해 반복적인 압축센싱 복원을 수행한다. 항공기 SAR 모델링 데이터와 위성 SAR 실측 데이터에 제안된 기법을 적용해서 SAR 영상 복원 성능을 평가한다.

II. 제안된 압축센싱 기반 CSA 영상 형성 기법

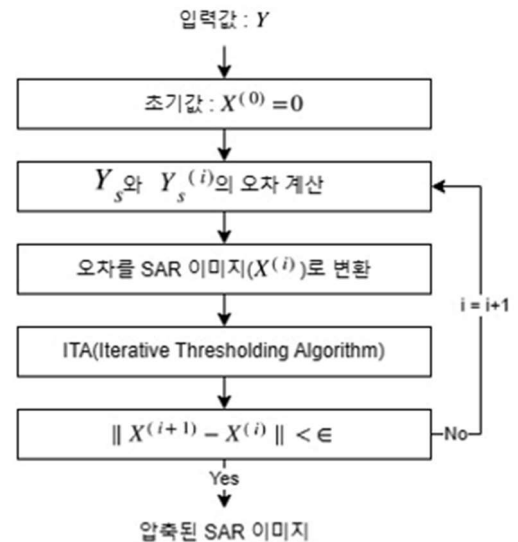


그림 1. 제안된 압축센싱 기반 CSA 영상 형성 기법

제안된 압축센싱 기반 CSA 영상 형성 기법은 다음 그림 1 과 같이 표현된다. 원시 데이터를 가로 거리방향, 세로 방위방향으로 정렬해서 행렬 Y 로 정의할 때 2 차원 랜덤 샘플링을 이용한 데이터 압축은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_s = \theta_a Y \theta_r \quad (1)$$

이때 θ_a 와 θ_r 은 각각 방위 및 거리방향 랜덤 샘플링 행렬을 의미한다. 압축센싱이 적용된 원시 데이터 Y_s 로부터 DTCWT 영역에서 희소성을 만족하는 SAR 이미지 X 를 복원하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\min_{\mathbf{X}} \left\{ \|\mathbf{Y}_s - \Theta_a \mathbf{G}(\mathbf{X}) \Theta_r\|_F^2 + \lambda \|\Psi(\mathbf{X})\|_1 \right\} \quad (2)$$

이때 $\|\cdot\|_F$ 와 $\|\cdot\|_1$ 은 각각 Frobenius norm 과 l_1 -norm 을 의미하고, λ 는 Lagrange 변수이며, $\Psi(\cdot)$ 는 DTCWT 함수이고, $\mathbf{G}(\mathbf{X})$ 는 SAR 이미지 \mathbf{X} 에서 원시 데이터를 구하는 ICSA 를 나타내는 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}(\mathbf{X}) = \mathcal{F}_a^{-1} \{ (\Phi_1)^* \mathcal{F}_r^{-1} \{ (\Phi_2)^* \mathcal{F}_r \{ (\Phi_3)^* \mathcal{F}_a \{ \mathbf{X} \} \} \} \} \quad (3)$$

이때 $\mathcal{F}_a\{\cdot\}$ 와 $\mathcal{F}_r\{\cdot\}$ 은 각각 방위 및 거리방향 푸리에 변환이고, Φ_1 는 처프 스케일링 위상 함수, Φ_2 는 거리 압축 위상 함수, Φ_3 은 방위 압축 위상 함수를 나타낸다. Φ_1 을 통해 differential RCMC 를 수행하고, Φ_2 는 bulk RCMC 와 SRC 를 수행하며, Φ_3 은 방위 압축과 잔여 위상 보정을 진행한다. 식(3)의 역과정으로 CSA 를 통해 원시 데이터에서 SAR 이미지를 생성하는 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}(\mathbf{Y}) = \mathcal{F}_a^{-1} \{ \Phi_3 \mathcal{F}_r^{-1} \{ \Phi_2 \mathcal{F}_r \{ \Phi_1 \mathcal{F}_a \{ \mathbf{Y} \} \} \} \} \quad (4)$$

SAR 영상의 초기값 $\mathbf{X}^{(0)}$ 를 0 으로 초기화하고 반복적으로 업데이트를 진행할 때, i 번째 업데이트 과정에서 오차 행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{R}^{(i)} = \mathbf{Y}_s^{(i)} - \Theta_a \mathbf{G}(\mathbf{X}^{(i)}) \Theta_r \quad (5)$$

그리고 오차 행렬 $\mathbf{R}^{(i)}$ 에 대응되는 SAR 이미지 오차를 구해서 SAR 이미지를 업데이트하고, ITA 를 위해 DTCWT 영역에서 임계화하는 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X}^{(i+1)} = \Psi^{-1} \left[Th_{\sigma} \left(\Psi(\mathbf{X}^{(i)} + \mu \mathbf{M}(\Theta_a^T \mathbf{R}^{(i)} \Theta_r^T)) \right) \right] \quad (6)$$

이때 $Th_{\sigma}(\cdot)$ 는 임계치 σ 를 적용한 소프트 임계화 과정으로 다음과 같이 주어진다.

$$Th_{\sigma}(x) = \text{sign}(x) \max(|x| - \sigma, 0) \quad (7)$$

위의 (1),(5)-(7)의 과정을 SAR 이미지의 변화량이 기준치 ϵ 보다 작아질 때까지 반복한다.

III. 모의실험 결과

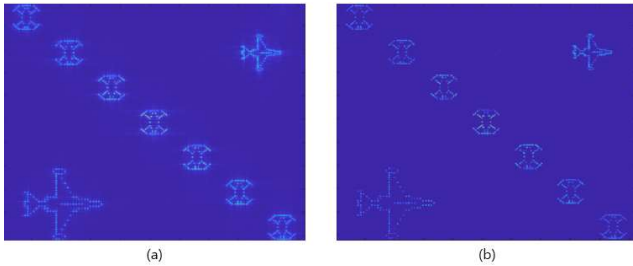


그림 2. 항공기 SAR 모델링 데이터를 통한 이미지 복원

그림 2 는 항공기 SAR 원시 데이터 모델링을 통해 복원한 256×256 크기 SAR 영상을 나타낸다. 그림 2(a)는 표준 CSA 로 복원한 이미지이고, 그림 2(b)는 거리 및 방위방향으로 각각 50% 압축된 원시 데이터에 제안된 복원 기법을 100 번 반복 적용해서 복원한 영상이다. CSA 대비 제안된 기법으로 적용한 이미지의 경우 표적 주변의 부엽(Sidelobe)가 감소해서 표적의 해상도가 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 3 은 위성 SAR 실측 데이터에 표준 CSA 와 제안된 기법을 적용했을 때 이미지 복원 결과를 비교해서 나타낸다. 영상 크기는 2048×3000 이고, DTCWT 의 임계값 $\sigma = 3$ 을 설정했으며, 제안된 기법의 경우 업데이트 과정을 100 번 수행하였다. 그림 3(a)는 해안지역 영상을 CSA 로 복원한

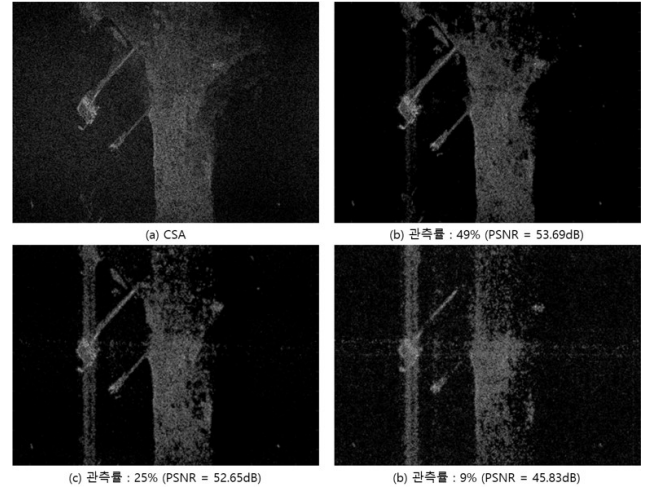


그림 3. 위성 SAR 실측 데이터를 이용한 이미지 복원

결과를 나타내고, 그림 3(b),(c),(d)는 제안된 압축센싱 기반 CSA에 거리 및 방위방향 관측률 70%(총 관측률 49%) 압, 50%(총 관측률 25%), 30%(총 관측률 9%)를 적용했을 때 생성된 이미지를 각각 나타낸다. 이때 CSA로 얻어진 SAR 영상을 기준으로 제안된 기법으로 얻어진 영상의 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)은 각각 53.69 dB, 52.65 dB, 45.83 dB로 측정되었다. 전체적으로 총 관측률 25% 이상인 경우 제안된 압축센싱 기반 CSA를 통해 주요 표적을 대부분 복원할 수 있고, 총 관측률 25% 미만인 경우 표적 정보 손실이 심하게 발생한다. 윈도우 11, 인텔 i7-11700K 3.5 GHz CPU, RAM 16 GB인 서버에서 모의실험을 진행했을 때 그림 3(b),(c),(d)를 얻기 위한 실행시간은 각각 26.07분, 15.15분, 13.10분이 소요되었다. 압축률이 높은 경우 표적 정보 손실로 인해 임계화 이후 0이 아닌 원소의 수가 작으므로 수렴시까지 실행시간이 감소함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 압축센싱 기반 CSA 를 이용한 SAR 이미지 복원 기법을 제안하고, SAR 모델링 데이터와 실측 데이터에 적용하여 영상 복원 성능을 검증하였다. 제안된 기법 적용시 부엽 감소에 의해 표적 해상도가 개선됨을 확인했고, 관측률 25% 이상인 경우 표적 정보를 대부분 복원할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 첨단분야 혁신융합대학사업(차세대통신)의 연구 결과이고, 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022R1F1A1073999).

참고 문헌

- [1] I. G. Cumming and F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data – Algorithms and Implementation*, Artech House, 2005.
- [2] M. Cetin et al., “Sparsity-driven synthetic aperture radar imaging,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 31, no. 4, pp. 27-40, July 2014.
- [3] J. Fang, Z. Xu, B. Zhang, W. Hong, and Y. Wu, “Fast Compressed Sensing SAR Imaging Based on Approximated Observation,” *IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 7, no. 1, pp. 352-363, Jan. 2014.
- [4] I. W. Selesnick, “The double-density dual-tree DWT,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 5, pp. 1304-1314, May 2004.