

차량용 SAR를 위한 개선된 거리-도플러 알고리즘

강준모, 윤희권, 이성욱

중앙대학교 전자전기공학과

{louis4748; gmlrnjs511; seongwooklee}@cau.ac.kr

Modified Range-Doppler Algorithm for Automotive SAR

Joonmo Kang, Heekwon Yoon, Seongwook Lee

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 전측방 레이더를 장착한 차량의 Synthetic aperture radar (SAR) 영상 형성을 위한 개선된 Range-Doppler algorithm (RDA)를 제안한다. 일반적으로 전측방 레이더를 장착한 차량 환경에서는 기존 RDA를 이용해 SAR 영상 형성을 할 경우, 표적의 위치 추정 오차가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 전측방 레이더의 순시 거리를 모델링하여 위치 추정 오차의 원인을 분석하고, 이를 보정하는 필터를 추가한 개선된 RDA를 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 성능을 검증한 결과 위치 오차가 97.41% 감소하였으며, 이를 통해 제안된 방법을 이용해 전측방 레이더를 장착한 차량에서 효율적인 SAR 영상 형성이 가능함을 확인하였다.

I. 서론

자율주행 시스템이 발전함에 따라, 주변 환경의 물리적 정보를 제공하는 차량용 Synthetic aperture radar (SAR) 기술이 주목받고 있다. 차량용 SAR 연구들은 주로 차량 진행 방향과 수직으로 배치된 측방 레이더를 중심으로 진행되어왔으나, 실제 상용 차량에는 측방 레이더뿐만 아니라 측면 및 대각 방향을 동시에 관측하기 위해 차량의 전측방과 측후방 등에 달린 레이더가 주로 활용된다 [1], [2]. 최근 이러한 SAR 기술에서는 영상을 효율적으로 형성하기 위해 Range-Doppler algorithm (RDA)을 사용한다. 다만, 측방 레이더가 아닌 관측 환경에서는 차량의 진행 방향과 레이더의 관측 방향이 수직이 되지 않아 레이더의 수신 신호에 도플러 중심편이가 발생하며, 기존의 RDA 방식으로 SAR 영상을 형성할 경우, 거리 및 방위 방향의 위치 오차가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 모델링된 점 표적의 기하 정보로부터 계산된 순시 거리를 테일러급수로 전개하여 왜곡 성분을 분석하고, 분석된 정보를 바탕으로 왜곡 성분을 보정하는 단계가 추가된 RDA 기법을 제안한다.

II. 본론

가. 전측방 레이더에서 수신된 수신 신호 표현

전측방 레이더에서의 수신 신호의 경우, 기존의 연구들에서 가정된 측방 레이더와 달리 차량의 이동 방향과 레이더 안테나의 중심 주엽 방향이 수직이 아닌 특정 각도를 유지하며, 시간에 따른 관측 표적까지의 순시 거리 변화가 복잡하다. 그림 1은 그런 전측방 레이더의 순시 거리 $R(\eta)$ 를 나타낸 것으로, v , η , θ , 그리고 r 은 각각 레이더가 장착된 차량의 이동 속도, 방위각 축으로의 이동 시간, 전측방 레이더가 기울어진 각도, 그리고 전파를 송신한 레이더의 위치와 관측 표적의 거리를 의미한다. 구체적으로 $R(\eta)$ 는 기하학적 관계에 의해

$$\begin{aligned} R(\eta) &= \sqrt{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - v\eta)^2} \\ &= \sqrt{r^2 + (v\eta)^2 - 2rv\eta \sin \theta} \end{aligned} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며, 이를 분석하기 위해 (1)을 $\eta=0$ 에서 테일러 급수로 전개하면

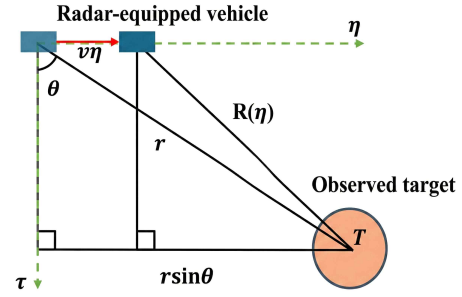


그림 1. 전측방 레이더 장착 환경에서 레이더와

관측 표적 사이의 순시 거리 모식도.

$$R(\eta) \approx r - v \sin \theta \eta + \frac{v^2 (\cos \theta)^2}{2r} \eta^2 \quad (2)$$

로 근사할 수 있다. 한편, 레이더로부터 송신된 신호는 관측 표적에 맞고 반사되어, 전파 이동 거리에 비례하는 시간 지연이 포함된 신호로 다시 레이더로 수신된다. 이후, 수신 신호는 기저대역 신호를 형성하기 위해 송신 신호와 혼합되고, 저대역 통과 필터를 거치게 되는데 이 과정은

$$S(\tau, \eta) = A \exp\left(j2\pi f_c \frac{2R(\eta)}{c}\right) \exp\left(j2\pi K \frac{2R(\eta)}{c} \tau\right) \quad (3)$$

로 표현할 수 있다. A 는 전파에 따라 감쇠된 신호의 크기, K 는 주파수 변화율, τ 는 처프 내 시간 변수를 의미하며, 수신 신호의 시간 지연의 경우 $v\eta$ 가 매우 작은 값이므로 $\frac{2R(\eta)}{c}$ 로 근사하였다. 이후 이 기저대역 신호는 아날로그-디지털 변환기를 통과하는데, (3)의 τ 를 한 처프 내의 샘플링 주기 T_s 로, η 를 처프 주기 T_c 로 샘플링하여 행렬 형태로 저장하게 된다. 이때의 신호는

$$\begin{aligned} S[n, m] &= A \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left(j2\pi f_c \frac{2R[m]}{c}\right) \\ &\quad \times \exp\left(j2\pi K \frac{2R[m]}{c} n T_s\right) \end{aligned} \quad (4)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 n 은 거리 축 인덱스, N 은 거리 축 최대 샘플 수, m 은 방위각 축 인덱스, M 은 방위각 축 최대 샘플 수를 의미한다. 결과적으로 (2)와 (4)를 통해 전측방 레이더에서의 기저대역 신호는

$$S[n, m] = A \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left(j \frac{4\pi}{c} (f_c + K n T_s)\right) \times \exp\left(j \frac{4\pi}{c} \left(r - v \sin \theta m T_c + \frac{v^2 \cos^2 \theta}{2r} (m T_c)^2\right)\right) \quad (5)$$

로 표현할 수 있고, 이 신호는 RDA를 거쳐 SAR 영상으로 합성되게 된다. 한편, (5)의 일차항 $v \sin \theta m T_c$ 는 측방 레이더에서는 0이 되는 값이다. 그러나 전측방 레이더에서는 이 항으로 인해 RDA를 거쳐며 추정해야 할 r 에 추가적인 왜곡이 발생한다. 또한, 측방 레이더의 경우 도플러 중심이 0인 반면, 전측방 레이더는 일차항에 의해 도플러 중심이 $-\frac{2v \sin \theta}{c} (f_c + K n T_s)$ 로 이동하는 도플러 중심 편이 현상이 나타나 기존의 RDA를 적용하면 방위각 축의 거리 추정 오차가 발생한다. 따라서 해당 항은 거리 및 방위각 방향 모두에서 위치 추정의 오차의 원인이 되므로, 올바른 SAR 영상 형성을 위해서 보정이 필요하다.

나. 제안하는 추가 보정 단계

그림 2에서 볼 수 있듯이, 위치 추정 오차를 보정하기 위해 기존 RDA 과정의 전처리 이후 위상 보정 과정을 추가한다. 위상 보정은 표적 위치 오차를 유발하는 일차항 성분을 상쇄하기 위한 과정으로, 기저 대역 신호는 보정 필터를 통과하게 된다. 이 필터는

$$h[n, m] = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left(j \frac{4\pi f_c}{c} (v \sin \theta m T_c)\right) \times \exp\left(j \frac{4\pi K}{c} (v \sin \theta m T_c) n T_s\right) \quad (6)$$

으로 표현되며, 일차항에서 기인한 위치 오차를 상쇄하기 위해 그림 2의 거리 압축 이전 단계에 적용된다. 위상 보정 이후의 기저 대역 신호는

$$S[n, m] = A \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left(j \frac{4\pi f_c}{c} \left(r + \frac{v^2 \cos^2 \theta}{2r} (m T_c)^2\right)\right) \times \exp\left(j \frac{4\pi K}{c} \left(r + \frac{v^2 \cos^2 \theta}{2r} (m T_c)^2\right) n T_s\right) \quad (7)$$

로 표현할 수 있고, 표적의 위치 오차를 유발하는 일차항이 상쇄되어있는 것을 확인할 수 있다.

다. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 확인하기 위해 점표적을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3은 기존 RDA와 제안하는 RDA를 적용한 SAR 영상들이며, 영상을 형성하기 위해 설정한 점 표적들은 각각 거리 3 m 그리고 5 m, 그리고 방위각 축 거리 4 m 그리고 5 m에 배치하였다. 그림 3 (b)는 $\theta = 30^\circ$ 일 때 기존 RDA 방식을 적용하여 형성한 SAR 영상이며, 보정되지 못한 일차항에 의해 추정된 표적의 위치에 오차가 존재한다는 것을 볼 수 있다. 반면 그림 3 (c)는 제안하는 RDA 방식을 적용하여 형성한 SAR 영상으로, 표적의 위치 추정 오차를 일으키는 일차항의 보정으로 표적의 위치 오차가 보정된 것을 확인할 수 있다. 제안된 기법의 성능을 정량적으로 확인하기 위해 표적 위치 오차 감소율을 측정하였으며, 이는 기존 RDA에서 발생한 표적 위치 오차를 기준으로 개선된 RDA 적용 후 보정된 위치 오차의 감소 비율로 정의된다. 그 결과, 개선된 RDA를 적용하

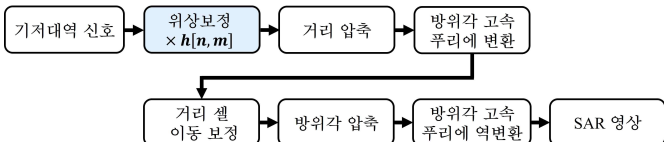


그림 2. 개선된 RDA의 신호처리 흐름도.

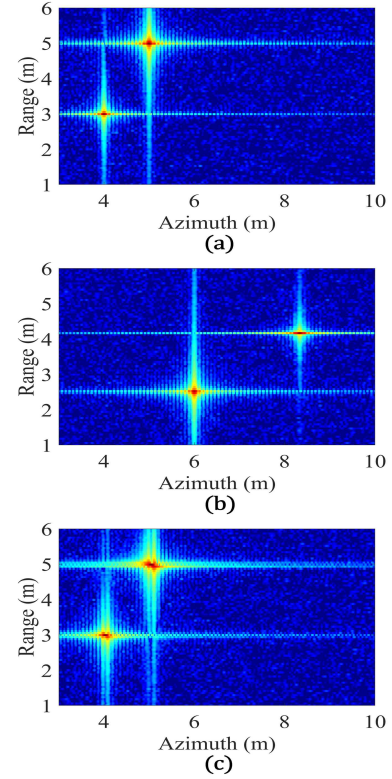


그림 3. SAR 영상 형성 결과: (a) 측방 레이더에서의 기존 RDA 적용 결과 (이상적인 결과), (b) 전측방 레이더에서 기존 RDA 적용 결과, (c) 전측방 레이더에서 개선된 RDA 적용 결과. 었을 때 기존 방식 대비 표적 위치 오차가 97.41% 감소하였다.

III. 결론

본 논문에서는 전측방 레이더 환경에서 기존 RDA를 이용한 SAR 영상 합성 시 발생하는 문제를 테일러 급수 전개를 통해 분석하고, 순시 거리의 일차항을 보정하는 단계를 추가한 개선된 RDA를 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 전측방 레이더 환경에서 점표적의 위치 정확도가 위상보정을 통해 효과적으로 향상됨을 확인하였다. 이를 통해 전측방 레이더 조건에서도 효과적인 영상 형성이 가능함을 입증하였으며, 측방 레이더를 전제로 한 기존 차량용 SAR 연구의 적용 범위를 확장할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00347032, 차세대 자율주행 기술을 위한 PMCW 기반 MIMO 디지털 레이더 SoC 개발).

참고 문헌

- [1] J. Lim, C. Park, and S. Lee, "Deep learning-based SAR image generation under non-uniform vehicle speed," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 163494-163508, September 2025.
- [2] H. Yoon, S. Park, S. Cho, B. Kim, and S. Lee, "Deep learning-based resolution enhancement for automotive SAR images under limited bandwidth constraints," *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 20, pp. 39260-39272, October 2025.