

# 고해상도 레이더 이미징을 위한 차량용 합성 개구 레이더 성능 분석

박정훈, 지오근, 문건휘, 이성욱\*, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어 통신 공동 연구소, \*중앙대학교 전자전기공학부

{hoon0337, wldhrms, mgh6325, sckim}@maxwell.snu.ac.kr, \*seongwooklee@cau.ac.kr

## Analysis of Automotive Synthetic Aperture Radar for High Resolution Imaging

Jeong-Hoon Park, Ohgeun Jee, Gunhwi Moon, Seongwook Lee\*, Seong-Cheol Kim,

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

\*School of Electrical and Electronics Engineering, College of ICT Engineering, Chung-Ang Univ.

### 요약

본 논문은 차량용 합성 개구 레이더 시스템의 설계를 위한 이미징 성능을 분석하고, 해당 구현을 위한 연구 방향을 제시한다. 합성 개구 레이더 시스템은 자차 속도 정보를 정확히 알고 있다는 가정하에, 레이더의 움직임에 따라 발생하는 공간 다이버시티를 활용하여 측면의 정확한 레이더 이미지를 얻을 수 있다. 하지만 속도 요동에 따라 누적되는 오차로 인해 이미지의 분해능뿐만 아니라 타겟 스펙트럼의 부엽수준이 열화되는 문제가 발생한다. 위 논문에서는 77 GHz 주파수 대역의 Frequency-modulated continuous wave 차량용 레이더를 활용한 합성 개구 레이더 시스템에서 위 효과를 합성 면적 시간에 따라 분석하고, 이는 추후 차량용 합성 개구 레이더 시스템 설계를 고도화하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### I. 서론

기존 다중 입출력 안테나 시스템(MIMO: Multiple-input and multiple-output)을 기반으로 하는 차량용 레이더는 높은 하드웨어 비용과 제한된 폼팩터로 인해 각도 추정 성능에 한계를 갖는다. 하지만, 레이더의 움직임에 따라 발생하는 공간 다이버시티를 활용하는 합성 개구 레이더 시스템(SAR: Synthetic aperture radar)은 단일 안테나 요소만을 이용하여 높은 이미징 성능을 나타내기 위해 기존 차량용 시스템 대비 효과적인 시스템 설계가 가능하다. 또한, 이는 측면의 타겟 이미징 성능이 감소하는 다중 입출력 레이더의 단점을 보완하는 해결책으로 활용될 수 있다.

하지만 반 파장에 해당하는 거리 오차가 누적되면 위상이  $2\pi$ 만큼 변동하기 때문에 신호처리를 위해서는 정확한 자차속도 정보를 요하게 되고, 대략 4 mm의 매우 짧은 파장을 갖는 77 GHz대역의 차량용 레이더 시스템은 이에 매우 취약한 구조이다. 특히, 기존 기법들에서는 제한된 합성 면적 시간( $T_{SAR}$ : Aperture time)내 속도가 일정하다고 가정하기에 이미지가 왜곡되는 현상이 발생한다. 본 논문에서는 실측 데이터를 활용하여 차량용 레이더 시스템에서 위 효과를 분석하고, Autofocus[1] 알고리즘을 활용하는 방식을 통해 위 효과를 완화할 수 있음을 제안한다.

### II. 본론

#### 2.1 다중 입출력 안테나 시스템 기반 레이더와 합성 개구 면적 레이더의 각도 분해능 성능 비교

본 절에서는 기존 다중 입출력 안테나 시스템 기반 레이더와 합성 개구 면적 레이더의 각도 분해능 성능을 타겟의 각도에 따라 분석한다. 차량용 레이더 정면 방향으로 25 km/h로 움직이고 있다고 가정하였고, 면적 시간은 50 ms로 가정하였다. 각 시스템의 각도 분해능은 레이더 배열의 총 면적에 따라 결정되는데, 합성 개구 레이더의 경우 신호를 송/수신하는 위치가 모두 바뀌므로 개구 면적의 2배에 해당하는 분해능을 얻을 수 있다. 이를 정리하면 표 1,2와 같다.

	$\phi = 0^\circ$ (Front)	$0^\circ < \phi < 90^\circ$	$\phi = 90^\circ$ (side)
MIMO processing	$\frac{\lambda}{A_s \cos \phi}$	$\frac{\lambda}{A_s \cos \phi}$	$\sqrt{\frac{2\lambda}{A_s}}$
SAR processing	$\sqrt{\frac{\lambda}{A_{SAR}}}$	$\frac{\lambda}{2A_{SAR} \sin \phi}$	$\frac{\lambda}{2A_{SAR} \sin \phi}$

표 1 각 레이더 시스템의 이론적 각도 분해능 수식 값

	$\phi = 0^\circ$ (Front)	$\phi = 10^\circ$	$\phi = 90^\circ$ (side)
MIMO processing	1.38°	1.59°	15.62°
SAR processing	4.34°	0.664°	0.332°

표 2 각 레이더 시스템의 이론적 각도 분해능 값 예시

이때,  $A_s$ ,  $\lambda$ ,  $\phi$ ,  $A_{SAR}$ 는 각각 다중 입출력 기반 레이더 시스템의 안테나 면적, 파장, 타겟 각도, 합성 개구 레이더 시스템의 합성 개구 면적을 의미한다. 다중 입출력 기반 레이더 시스템의 경우에는  $\lambda/2$ 의 등 간격을 가지는 100개의 안테나 요소를 가정하였고, 이는 정면에서의 높은 각도 분해능을 가짐을 확인할 수 있다. 합성 개구 레이더의 경우, 단일 안테나 요소만으로도 높은 각도 분해능을 보이며, 특히 측면에서 이론적으로 높은 분해능을 보임을 확인할 수 있다.

#### 2.2 합성 개구 레이더 시스템의 수신 신호 모델

수신 신호에 대해 정합필터를 통과한 합성 개구 면적 레이더의 수신 신호 모델은 다음과 같이 주어진다[2].

$$s_{rc}(r(t)) = \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r(t) - r_0(t))\right) \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}r_0(t)\right), \quad 0 < t < T_{SAR} \quad (1)$$

이때,  $r(t)$ ,  $r_0(t)$ ,  $B$ ,  $c$ 는 각각 레이더 이미지를 형성하려는 지점에서 레이더까지의 거리, 실제 타깃에서부터 레이더까지의 거리, 대역폭, 빛의 속도를 의미한다. 시간  $t$ 에 따라 움직이면서 취득한 레이더 수신 신호로부터 Backprojection 기법[3]을 활용하여 형성한 특정 지점  $\vec{x}$ 에서의 스펙트럼은 다음과 같이 주어진다.

$$I(\vec{x}) = \int_{t=0}^{t=T_{SAR}} s_{rc}(r(t)) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}r(t)\right) dt \quad (2)$$

위 적분 식에 따라 레이더 정면 방향으로 일정한 속도  $v$ 로 움직이는 차량과, 레이더 정면으로부터  $\phi_0$ 의 각도를 가지는 타깃에 대하여 형성되는 스펙트럼은 다음과 같이 주어진다.

$$I(\vec{x}) = D \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r_0 - r)\right) \text{sinc}\left(\frac{2vT_{SAR}}{\lambda}(\cos(\phi) - \cos(\phi_0))\right) \quad (3)$$

이때,  $r_0 = r_0(t=0)$ ,  $r = r(t=0)$ 을 의미한다.

### 2.3 실험 환경

레이더 파라미터를 설정할 때 처프당 시간 간격 ( $T_c$ )을 자차의 속도에 맞게 설정해 주어야 하는데, 이 시간 동안 차량이 이동한 거리는  $vT_c$ 로 주어지게 된다. 식 (1)에 따르면, 연속한 처프간 위상 차이는  $\frac{4\pi v T_c}{\lambda}$ 으로 주어지고, 이는 aliasing을 발생시키지 않을 조건을 만족시키기 위해  $[-\pi, \pi]$ 구간에 속해야 한다. 따라서, 차량의 최대 속도와 처프당 시간 간격 사이에는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$vT_c < \frac{\lambda}{4} \quad (4)$$

차량이 저속으로 주행하고 있는 상황에서 위의 조건을 만족하는 표 3과 같은 레이더 파라미터를 활용하였다. Texas Instruments 사의 77 GHz 대역 차량용 FMCW 레이더 AWR 1642를 활용하였으며 전방에 코너리플렉터를 설치하였고, 레이더를 정면 방향으로 이동하면서 데이터를 취득하였다. 차량의 속도는 특정 방향으로 일정하다는 가정하에 피크에서 나타나는 위상 성분을 통해 정확한 자차 속도를 Autofocus 기법으로 추정하였고, 식 (2)의 Backprojection 기법을 통해 SAR 이미지를 획득하였다.

파라미터	값
시작 주파수 ( $f_c$ )	77.25 GHz
샘플링 주파수	6.25 MHz
대역폭 ( $B$ )	3.44 GHz
처프 당 시간 간격 ( $T_c$ )	200 $\mu$ s
한 처프 내 샘플 수 ( $N_s$ )	512

표 3 레이더 파라미터

### 2.4 실험 결과

서로 다른 합성 면적 시간에 대해 autofocus 알고리즘이 수행되었다. 실험 결과, 이론값과 일치하듯이 합성 면적 시간이 길수록 이미지의 분해능이 높아진다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 속도 요동에 의하여 부엽수준이 높아진다는 것을 확인할 수 있는데, sinc함수의 이론적인 주엽 대 부엽비 (PSR: Peak to sidelobe ratio)값인 0.217 대비하여 면적 시간이 길수록 PSR 값이 더 커져서 이미징 성능이 열화된다는 것을 확인할 수 있다.

$T_{SAR}$ (ms)	100	200	400	600
PSR	0.211	0.281	0.388	0.689

표 4 면적 시간에 따른 PSR 값

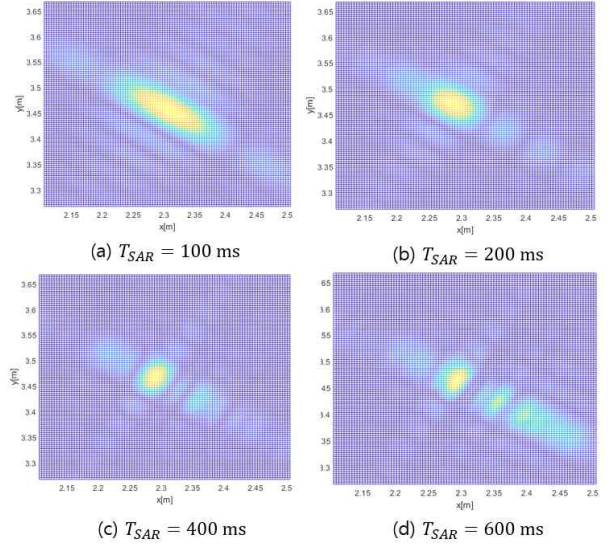


그림 1 면적 시간에 따른 SAR 이미지 형성 결과

## III. 결론

본 논문에서는 차량용 합성 개구 레이더 시스템에서 이미징 성능을 면적 시간에 따라서 분석하였다. 면적 시간 동안 자차 속도가 일정하다는 가정하에 SAR 프로세싱을 한 결과, 면적 시간이 긴 시스템일수록 이미지의 분해능이 증가하지만 PSR이 높아지는 결과를 관찰할 수 있었다. 이는 이론적으로 발생하는 식 (3)의 sinc 함수 형태로 나타나는 이상적인 타깃 스펙트럼과는 상이한 결과로 확인된다.

따라서, 본 논문은 차량용 합성 개구 레이더 시스템에서 면적 시간이 제한되어야 하고, 추가적으로 고도화된 Autofocus 기법을 사용하거나 타 센서들을 활용하여 실시간으로 자차의 속도를 정확하게 추정할 필요가 있다는 점을 시사한다. 추후 연구에서는 높은 각도 분해능을 갖는 SAR 이미지를 형성하기 위하여 선행되어야 할 자차 속도 알고리즘과 속도 요동에 의한 타깃 스펙트럼의 왜곡에 대한 면밀한 연구를 진행하고자 한다. 이와 같은 연구들은 추후 차량용 레이더 시스템을 합성 개구 레이더까지 실현할 수 있게끔 발전시키는데 기여하고, 최소한의 하드웨어 비용으로 최상의 해상도를 갖는 레이더 이미지를 취득하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 (해당연도)년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20014098).

## 참고 문헌

- [1] Zhao, Lifan, et al. "An autofocus technique for high-resolution inverse synthetic aperture radar imagery." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 52.10 (2014): 6392-6403.
- [2] Manzoni, Marco, et al. "Motion estimation and compensation in automotive MIMO SAR." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 24.2 (2022): 1756-1772.
- [3] Cumming, Ian G., and Frank H. Wong. "Digital processing of synthetic aperture radar data." Artech house 1.3 (2005): 108-110.