

차량용 FMCW 레이더 시스템에서 Range-Velocity Coupling 보정 기법

문건휘, 박정훈, 전태영, 김성철

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소

{mgh6325, hoon0337, junty1, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

Velocity Ambiguity Estimation Using Range - Velocity Correction in Automotive FMCW Radar Systems

Moon Gunhwi, Park Jeong-Hoon, Tae Young Chun, Kim Seong-Cheol

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National University

요약

본 논문은 차량용 레이더 시스템에서 고속 주행 환경으로 인해 발생하는 레이더 신호 모델의 왜곡 보정 및 Doppler ambiguity 추정을 동시에 수행하는 기법을 제안한다. 먼저, range-velocity coupling 위상 정보에 대한 matched filter 설계를 통하여 Doppler ambiguity가 발생한 타깃의 속도 정보를 복원 및 range-velocity를 보정하는 기법을 제안한다. 성능평가를 위해 range-angle response에서 보정된 점 타깃의 impulse response function 및 peak power를 비교하였다. Range-angle response에서 각 Doppler ambiguity 발생 횟수에 따라 보정된 점 타깃의 impulse response function의 차이가 생김을 확인하였고, 실제 발생한 Doppler ambiguity 횟수 이용하여 보정하는 경우 peak power가 다른 경우보다 최소 2dB 높음을 확인하였다.

1. 서론

자차 속도를 추정하기 위해서 카메라, 레이더 센서, 라이다(LiDAR), 위성항법시스템(GNSS) 등 다양한 센서들이 사용되고 있다. 이 중에서 레이더는 악천후와 저조도 조건을 포함한 다양한 환경에서 안정적인 성능을 보이며, 단일 프레임에서 반사 신호의 도플러 편이를 추출함으로써 짧은 시간에 자차 속도를 추정이 가능한 센서이다 [1]. 그러나 고속 주행 환경에서 레이더 신호는 Doppler ambiguity가 발생할 수 있으며, 신호 모델에 대한 근사화 가정이 깨져 발생한 왜곡으로 인해 속도 추정 성능 또한 저하된다 [2].

본 논문에서는 고속 주행에서 발생한 Doppler ambiguity 및 신호 모델 왜곡을 보상하기 위해서 range-velocity coupling 성분을 반영한 레이더 신호 모델을 설계한다. 이후 range-velocity coupling 성분에서 matched filter를 각 Doppler ambiguity 발생 횟수에 따라 설계하고, compressed signal gain을 기준으로 발생한 Doppler ambiguity 횟수를 추정하여 최적의 matched filter를 선별하는 방법에 대해 제안한다.

II. 본론

가. 측정 및 실험 환경

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였으며, 서로 반대되는 방향으로 주행하는 두 차량을 고려하였다. 여기서, 타깃의 거리는 15 m이며, 상대 속도는 155 km/h로 설정하였다. 표 1은 해당 레이더 파라미터를 보여준다.

파라미터	값
반송 주파수 f_c	77 GHz
대역폭 B	2 GHz

처프 시간 T_c	51.2 μ s
ADC 샘플수 N	512
처프 수 M	64
거리 분해능 R_{res}	7.5 cm
속도 분해능 V_{res}	0.165 m/s
최대 탐지 속도 V_{max}	10.6 m/s

표 1 FMCW 레이더 파라미터

나. FMCW 레이더 신호 모델

FMCW 레이더는 주파수가 선형적으로 증가하는 처프 신호를 송·수신하며, mixer 및 low-pass filter (LPF)를 거쳐 아래 식 (1)과 같은 신호로 표현된다.

$$s_b(t, i) \cong \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}at^2\right)\right)\exp\left(-j2\pi\left(f_c t_{sl} + \frac{1}{2}at_{sl}^2\right)\right), \quad (1)$$

여기서 a , f_c , t , 그리고 t_{sl} 은 각각 chirp rate, 반송 주파수, fast time 그리고 slow time을 의미한다. 수신 신호는 왕복 지연(round-trip delay)을 포함한 채 수신되며 ($t_{sl} = t - (2R + 2v(t + (i-1)T_c))/c$), i 는 chirp index를 의미한다($i = 0, 1, \dots, M-1$). 그림 1은 식 (1)의 beat signal $s_b(t, i)$ 을 2D-FFT를 통해 생성된 range - velocity response를 보여준다. Range - velocity coupling의 증가로 impulse response function (IRF)의 분해능이 저하됨을 확인할 수 있다.

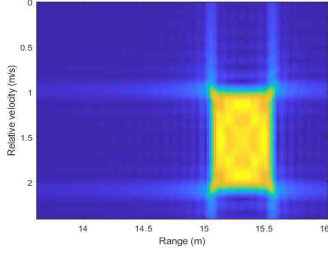


그림 1. 보정하지 않은 beat signal의 range - velocity response

다. Range-velocity coupling 보상을 위한 matched filtering

식 (1)에서 range-velocity coupling 성분의 위상에 conjugate를 취하면 아래와 같이 정의되며, matched filter에 해당한다.

$$s_{mat}(t, i) = \exp\left(-\frac{j8\pi\alpha}{c} l_{am} V_{max} T_c (i-1)t\right), \quad (2)$$

여기서 l_{am} 은 Doppler ambiguity 발생 횟수를 의미한다. 이후, 식 (1)에서 정의된 beat signal $s_b(t, i)$ 과 $s_{mat}(t, i)$ 을 곱하고 2D-FFT를 취하여 filtering 과정을 거친다.

라. 실험 결과

아래 그림. 2와 그림. 3은 각 Doppler ambiguity 발생 횟수 l_{am} 에 따라 설계된 matched filter를 beat signal $s_b(t, i)$ 에 적용한 결과다. 타깃 신호의 Doppler ambiguity가 4번 발생하였고, 그림 1의 왼쪽은 IRF이 sinc 함수의 형태로 잘 복원함을 보여준다. 이후 Doppler ambiguity 발생 횟수 오차가 증가함에 따라 IRF의 분해능 감소함을 알 수 있다.

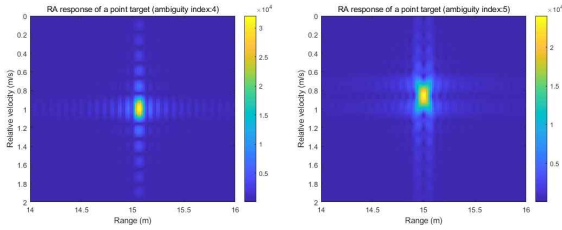


그림 2. 설계된 matched filter 적용에 따른 range - velocity response (좌: $l_{am} = 4$, 우: $l_{am} = 5$)

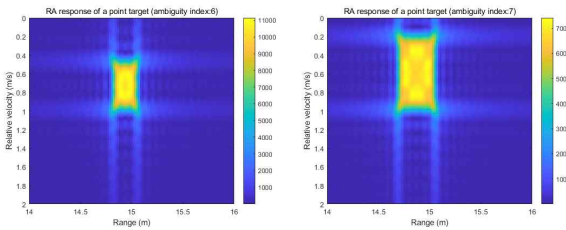


그림 3. 설계된 matched filter 적용에 따른 range - velocity response (좌: $l_{am} = 6$, 우: $l_{am} = 7$)

그림 4는 각 l_{am} 에 따른 matched filter로 보정한 타깃 신호의 peak power를 보여준다. $l_{am} = 4$ 에서 peak power가 가장 높기 때문에 해당 matched filter가 최적의 필터임을 알 수 있음과 동시에 $l_{am} = 4$ 임을 이용하여 실제 타깃 속도를 추정할 수 있다 ($\hat{v} = l_{am} * 2 V_{max} + \hat{v}_0$). 여기서 \hat{v} 그리고 \hat{v}_0 은 각각 실제 상대 속도 그리고 V_{max} 을 최대 탐지 속도로 갖는 레이더 시스템에서 추정된 속도를 의미한다.

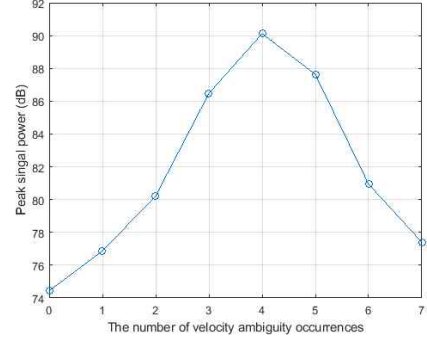


그림 4 Doppler ambiguity 발생 횟수 l_{am} 에 따른 타깃 신호에 대한 peak power

III. 결론

본 논문에서는 고속 주행하는 환경에서 발생하는 신호 모델을 설계하고, matched filter를 설계하여 타깃의 ambiguity를 추정하는 방법을 제안하였다. 실험 결과 제안 기법을 통해 보정과 Doppler ambiguity를 추정을 동시에 수행할 수 있었다. 시뮬레이션 상에서 Doppler ambiguity 발생 횟수에 따라 보정하여 IRF의 차이가 생김을 확인하였고, 실제 발생한 Doppler ambiguity 횟수 이용하여 보정하는 경우 peak power가 다른 경우보다 최소 2dB 정도 높음을 확인하였다. 따라서 본 논문은 차량용 FMCW 레이더 기반 센싱 성능의 정확성과 신뢰성을 향상시키는 데 기여할 것으로 예상되며, 향후 타깃 종류 및 다양한 환경에서의 정확성 검증을 지속할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20014098).

참 고 문 헌

- [1] Rendas, Maria-João D., and José MF Moura. "Ambiguity in radar and sonar." IEEE Transactions on Signal Processing 46.2 (2002): 294-305.
- [2] Wang, Yanxing, et al. "Resolving Doppler ambiguity for fast-moving targets with FDA-MIMO radar." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 59.5 (2023): 5915-5929.