

# 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.

### I. 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 성분에 대한 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.

|                    |              |
|--------------------|--------------|
| 처프 시간 $T_c$        | 51.2 $\mu$ 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·수신 하며, mixer 및 low-pass filter (LPF)를 거쳐 아래 식 (1)과 같은 신호로 표현된다.

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

여기서  $\alpha$ ,  $f_c$ ,  $t$ , 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( $i = 0, 1, \dots, M-1$ ). 그럼 1은 식 (1)의 beat signal  $s_b(t, i)$ 을 2D-FFT를 통해 생성된 range - velocity response을 보여준다. Range - velocity coupling의 증가로 impulse response function (IRF)의 분해능이 저하됨을 확인할 수 있다.

| 파라미터         | 값      |
|--------------|--------|
| 반송 주파수 $f_c$ | 77 GHz |
| 대역폭 $B$      | 2 GHz  |

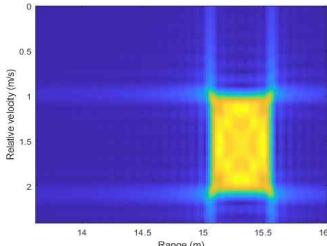


그림 1. 보정하지 않은 beat signal의 range - velocity response

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 횟수가 증가함에 따라 IRF의 분해능 감소함을 알 수 있다.

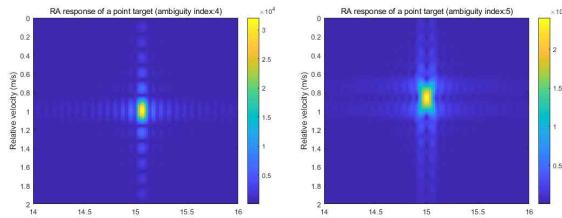


그림 2. 설계된 matched filter 적용에 따른 range - velocity response (좌:  $l_{am} = 4$ , 우:  $l_{am} = 5$ )

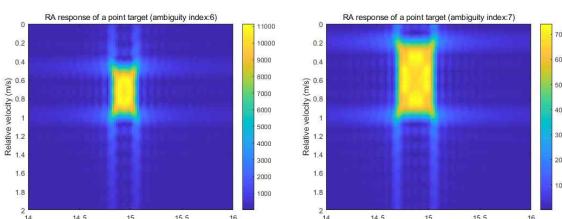


그림 3. 설계된 matched filter 적용에 따른 range - velocity response (좌:  $l_{am} = 6$ , 우:  $l_{am} = 7$ )

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 ( $\hat{v} = l_{am} * 2V_{\max} + \hat{v}_0$ ). 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.

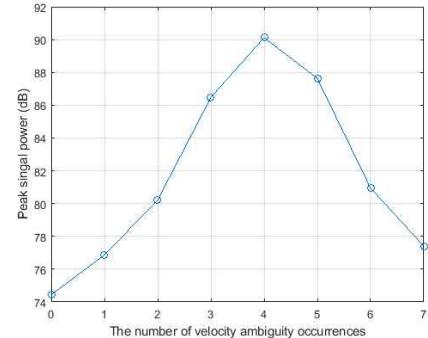


그림 4. Doppler ambiguity 발생 횟수  $l_{am}$ 에 따른 타깃 신호에 대한 peak power

### 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.