

V2V 통신을 위한 차량용 FMCW 및 PMCW 시스템 사이의 상호 간섭 영향 분석

윤희권, 박찬율, 조선민, 이성욱

중앙대학교 전자전기공학과

{gmlrnjs511; qkrcksdnf97; tjsals4514; seongwoolee}@cau.ac.kr

Analysis of Mutual Interference Between Automotive FMCW and PMCW Systems for V2V Communications

Heekwon Yoon, Chanul Park, Seonmin Cho, Seongwook Lee

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

요약

자율주행 및 통합 센싱-통신 시스템의 발전에 따라, 도로 환경에서 다양한 유형의 차량용 레이더가 운용될 것으로 예측된다. 이에 따라 이종 레이더 간에 발생할 수 있는 상호 간섭을 파악하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 동일한 주파수 대역 내에서 동작하는 Frequency modulated continuous wave (FMCW) 레이더와 Phase modulated continuous wave (PMCW) 레이더 간의 상호 간섭으로 인한 영향을 분석하였다. 이를 위해 간섭 신호를 모델링하고, 시뮬레이션을 통해 FMCW 레이더와 PMCW 레이더가 각각 간섭원 및 피간섭원으로 작용할 때 수신 신호에 미치는 영향을 파악하였다.

I. 서론

최근 자율주행 기술과 Integrated sensing and communication (ISAC) 시스템의 발전에 따라, 다양한 레이더 시스템 간의 공존이 필수적인 과정으로 떠오르고 있다. 특히, Frequency modulated continuous wave (FMCW) 레이더는 상대적으로 낮은 샘플링 주파수로도 운용이 가능하여 구현이 간단하고 가격이 저렴하면서도 정밀한 표적 탐지가 가능하다는 장점으로 인해 상용 차량용 레이더로 널리 채택되어 왔다. Phase modulated continuous wave (PMCW) 레이더는 코드 기반의 디지털 변조 방식을 통해 우수한 사이드로브 억제 성능을 보이며, 간섭에 대한 우수한 내성 덕분에 ISAC 시스템 구현에 적합한 차세대 차량용 레이더 기술로 주목받고 있다. 이러한 이유로 두 시스템은 실제 도로 환경에서 공존할 가능성이 높다[1]. 두 레이더 시스템은 상이한 신호 구조를 사용하며, 동일한 주파수 대역에서 운용될 경우 상호 간섭이 발생한다. 그 결과, 수신 신호의 품질이 저하되고 거리, 속도 추정 성능의 열화와 같은 문제가 발생한다. 본 논문에서는 FMCW 레이더와 PMCW 레이더 간의 상호 간섭 시나리오를 설정하고 시뮬레이션을 수행하여 이종 레이더 간 상호 간섭의 영향을 분석하였다. 이를 통해 이종 레이더 간의 간섭 회피 기법 개발을 위한 기초 자료를 제시한다.

II. 본론

가. FMCW 레이더에 대한 PMCW 간섭원의 영향

FMCW 레이더의 수신기에 PMCW 간섭 신호가 유입될 경우를 고려하였다. 이때, 시간 지연 τ 를 가지고 수신되는 PMCW 간섭 신호는

$$s_{\text{rx, FMCW}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \text{rect}\left(\frac{t-nT_c-\tau}{T_c}\right) \exp(j2\pi f_{c,iP}(t-\tau)) \quad (1)$$

로 표현할 수 있다[2]. 여기서 $f_{c,iP}$ 는 간섭원인 PMCW 레이더의 중심 주파수, n 은 칩 인덱스, N 은 칩 수를 의미한다. 또한, T_c 는 칩의 지속

시간이며, a_n 은 n 번째 칩의 이진 위상 변조 심볼을 나타낸다. 해당 PMCW 간섭 신호는 FMCW 레이더 수신기 내에서 FMCW 송신 신호와의 믹싱 및 저역 통과 필터링을 포함한 하향 변환 과정을 거치게 되며 이는

$$s_{\text{bb, FMCW}}(t) = s_{\text{rx, FMCW}}(t) \exp\left(-j2\pi\left[\left(f_c - \frac{B}{2}\right)t + \frac{K}{2}t^2\right]\right) \quad (2)$$

과 같이 표현된다. 여기서 f_c 는 중심 주파수, B 는 대역폭을 의미하며, K 는 주파수 변화율을 의미한다. 최종적으로 FMCW 레이더에서 하향 변환된 PMCW 간섭원의 신호는

$$s_{\text{bb, FMCW}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \text{rect}\left(\frac{t-nT_c-\tau}{T_c}\right) \times \exp\left(j2\pi\left[\left(f_{c,iP} - f_c + \frac{B}{2}\right)t - \frac{K}{2}t^2 - f_{c,iP}\tau\right]\right) \quad (3)$$

로 표현된다. 이후, 샘플링된 신호에 2차원 푸리에 변환을 적용함으로써, 거리 및 속도 정보를 포함하는 Range-velocity (RV) 맵을 생성한다.

나. PMCW 레이더에 대한 FMCW 간섭원의 영향

PMCW 레이더의 수신기에 FMCW 간섭 신호가 유입될 경우를 고려하였다. FMCW 레이더에서 송신된 간섭 신호의 경우 시간 지연 τ 를 가지고 PMCW 수신기에 도달한다. 이때의 수신 신호는

$$s_{\text{rx, PMCW}}(t) = \exp\left(j2\pi\left[\left(f_{c,iF} - \frac{B}{2}\right)(t-\tau) + \frac{K}{2}(t-\tau)^2\right]\right) \quad (4)$$

가 된다. 여기서 $f_{c,iF}$ 는 간섭원인 FMCW 레이더의 중심 주파수이다. 해당 FMCW 간섭 신호는 PMCW 레이더에서 하향 변환되며 이는

$$s_{bb, \text{PMCW}}(t) = \exp\left(j2\pi\left[\left(f_{c,iF} - f_c - \frac{B}{2}\right)t + \frac{K}{2}(t-\tau)^2 - \left(f_{c,iF} - \frac{B}{2}\right)\tau\right]\right) \quad (5)$$

와 같다. 이후 샘플링된 신호에 상관 연산과 1차원 푸리에 변환을 적용함으로써, 거리 및 속도 정보를 추출할 수 있다.

다. 시뮬레이션 결과

FMCW 레이더와 PMCW 레이더 간의 상호 간섭을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1과 같이 시스템 파라미터를 설정하였으며 그림 1과 같이 동일한 주파수 대역에서 동작하는 FMCW와 PMCW 레이더를 장착한 차량이 표적 차량을 탐지하면서 간섭이 발생하는 상황을 설정하였다. 이때 각 레이더 탑재 차량으로부터 표적 차량까지의 거리는 20 m, 레이더 탑재 차량 간의 거리는 35 m로 설정하였다.

그림 2는 FMCW 레이더의 RV 맵을 보여준다. 간섭이 발생한 경우인 그림 2 (b)의 경우, 간섭이 발생하지 않은 경우인 그림 2 (a)와 비교하여 특정 속도 범위에서 수직선 형태로 나타나는 강한 간섭 성분이 관찰된다. 이는 (3)에서 확인할 수 있는 $Bt/2 - f_{c,iP}\tau$ 항에 의해 발생하는 것이다. 이때 FMCW 레이더는 PMCW 레이더보다 낮은 샘플링 주파수를 가지므로 특정 속도 범위에서 강하게 나타나는 간섭 성분은 거리 축 상에서는 산발적으로 분포한다. 또한 $Kt^2/2$ 항은 주파수 영역에서 특정 주파수 성분으로 나타나지 않고 RV 맵 전 영역에 걸쳐 잡음 성분 증가를 유발한다. 하지만 상대적으로 강한 간섭을 유발하는 1차 항에 비해 그 영향은 제한적이다. 즉, PMCW 간섭 신호는 FMCW 레이더에 대해 특정 속도 범위에서 강하게 나타나는 간섭 성분을 유발하며, 이는 오경보율을 높일 수 있다.

그림 3은 PMCW 레이더의 RV 맵을 보여준다. 그림 3 (a)는 상호 간섭이 발생하지 않은 경우의 RV 맵을 보여주며, 표적 차량의 속도에 해당하는 범위에서 나타나는 사이드로브는 PMCW 레이더에서 사용하는 이진 시퀀스의 상관 특성에 의한 현상이다. 그림 3 (b)는 FMCW 간섭원에 의한 상호 간섭이 발생한 경우의 RV 맵을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 FMCW의 간섭 신호에 의해 평균 잡음 수준이 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 (5)에서 확인할 수 있는 $K(t-\tau)^2/2$ 항의 영향이며, 샘플링 주파수가 FMCW 레이더 대비 높은 PMCW 레이더에서는 그 영향이 두드러지게 나타난다. 따라서 간섭의 영향이 특정 영역에만 집중되는 것이 아니라, RV 맵 전반에 걸쳐 나타난다.

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 시스템 파라미터

파라미터	값 (PMCW)	값 (FMCW)
중심 주파수, $f_c, f_{c,iP}, f_{c,iF}$	77 GHz	77 GHz
샘플 수, N	1000	500
대역폭, B	1 GHz	500 MHz
펄스 반복 주기	10 μ s	10 μ s
샘플링 주파수	1 GHz	50 MHz

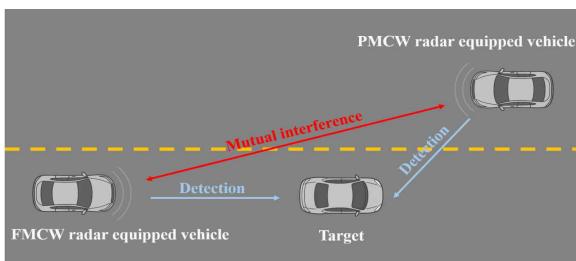


그림 1. 시뮬레이션 시나리오

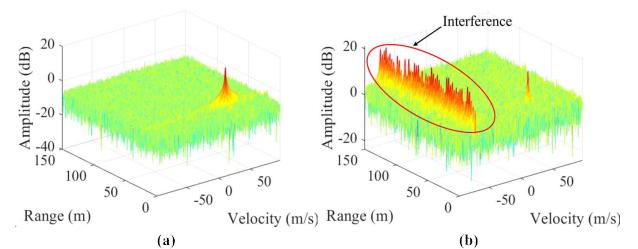


그림 2. FMCW 레이더의 RV 맵: (a) 상호 간섭이 발생하지 않은 경우, (b) PMCW 간섭원에 의한 상호 간섭이 발생한 경우

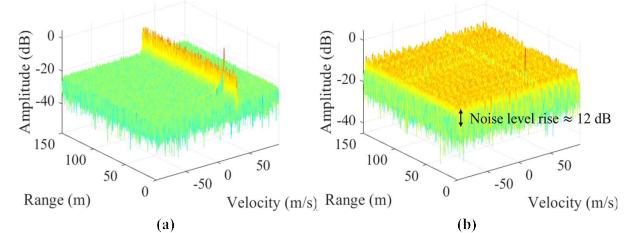


그림 3. PMCW 레이더의 RV 맵: (a) 상호 간섭이 발생하지 않은 경우, (b) FMCW 간섭원에 의한 상호 간섭이 발생한 경우

III. 결론

본 논문에서는 PMCW 레이더와 FMCW 레이더 간의 상호 간섭의 영향을 분석하였다. 이를 위해 이종 레이더 간의 상호 간섭 시나리오를 구성하고, 모델링된 간섭 신호를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 간섭의 영향을 RV 맵에서 분석해 본 결과, 두 시스템 모두 상호 간섭으로 인한 성능 저하가 발생하였으나 그 양상은 상이하였다.

FMCW 레이더의 경우, PMCW 간섭원에 의해 특정 속도 범위에서 잡음 레벨이 증가하며, 이로 인해 오경보가 발생할 가능성이 높아진다. PMCW 레이더는 FMCW 간섭원으로 인해 전반적인 신호 대 잡음비 저하가 관측되며, 이는 표적 탐지의 실패로 이어질 수 있다. 따라서 간섭원을 파악하고 이에 대응할 수 있는 시스템 맞춤형 간섭 억제 및 회피 기술의 개발이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00405510).

참고 문헌

- [1] Z. Wei et al., "Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: A survey," IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 13, pp. 11068–11092, July 2023.
- [2] S. H. Dokhanchi, B. S. Mysore, K. V. Mishra, and B. Ottersten, "A mmWave automotive joint radar-communications system," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, no. 3, pp. 1241–1260, June 2019.