

MPSK-MIMO FMCW 레이더에서 위상 천이 오류로 인한 고스트 타겟 완화 기법

박정훈, 윤영준, 정재훈, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소

{hoon0337, yyj0109, jay623, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

Ghost Target Mitigation Method Due to Phase Shifter Error in MPSK-MIMO FMCW Radar

Jeong-Hoon Park, Young-Jun Yoon, Jae-Hoon Jung, Seong-Cheol Kim

INMC and Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul Nat'l Univ.

요약

본 논문은 Chirp마다 코드를 삽입하는 CDM(Code Division Multiplexing)방식의 MPSK(M Phase Shift Keying)-MIMO(Multi Input Multi Output) FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더에서 발생하는 고스트 타겟의 원인을 분석한다. 각 송신 안테나마다 서로 다른 값의 위상 천이를 Chirp마다 인가하는 방식으로 MPSK 코드를 삽입하여 송신 신호를 분리하는 CDM 방식의 MPSK-MIMO FMCW 레이더 시스템을 상정하고, 시뮬레이션을 바탕으로 위상 천이기의 오류가 고스트 타겟을 발생시키는 것을 확인한다. 또한, 실측 데이터를 기반으로 위상정보 후처리 보정을 통해 고스트 타겟을 10dB 가까이 완화할 수 있음을 확인한다.

I. 서론

수신단에서 TDM(Time Division Multiplexing)/BPM(Binary Phase Multiplexing) 등의 전략을 사용하는 MIMO(Multi Input Multi Output)-FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)레이더를 통해 정밀한 각도 추정 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 위 방식들은 수신단에서 송신단의 신호를 분리하여 센서의 집적화나 비용적인 측면에 이점을 가지지만 최대 탐지속도가 감소한다는 단점을 가지게 된다.

본 논문에서는 최대 탐지속도의 감소 없이 사용 가능한 MPSK(M-Phase Shift Keying)기반 MIMO-FMCW 레이더를 소개하고, MPSK 코드를 삽입하기 위해 Chirp마다 위상 천이를 발생시키는 과정에서 발생하는 고스트 타겟을 해결하기 위한 과정을 다룬다. 먼저, 위상 천이기의 오류 모델링을 바탕으로 한 시뮬레이션을 통해 고스트 타겟이 나타남을 보이고, 실측 데이터 기반 위상 정보를 후처리 보정하는 과정을 통해 고스트 타겟을 완화함으로써 위 문제를 개선하는 과정을 다룬다.

그림 1은 각 CDM 방식의 MPSK-MIMO FMCW 레이더에서 각 Tx마다 Chirp 별로 서로 다른 위상 천이를 가하는 것을 나타낸다. Tx2, Tx3는 Chirp별로 각각 90, 135도의 위상 천이를 가하는 상황을 시뮬레이션 하였다. 거리 25m 위치에 -2m/s의 속도를 갖는 단일 타겟을 가정하였으며 수신신호를 2D-FFT하여 거리-속도 영역에서 피크를 관찰한 결과, 위상 천이로 인해 속도 영역에서 $\pi/2$, $3\pi/4$ 만큼 천이되어 나타남을 확인할 수 있다. 이는 각각 Tx2, Tx3로 부터 온 송신신호에 의해 나타난 피크로, 피크의 위치에 따라 송신단의 신호를 분리하여 최대 탐지 속도의 감소 문제를 해결할 수 있다.

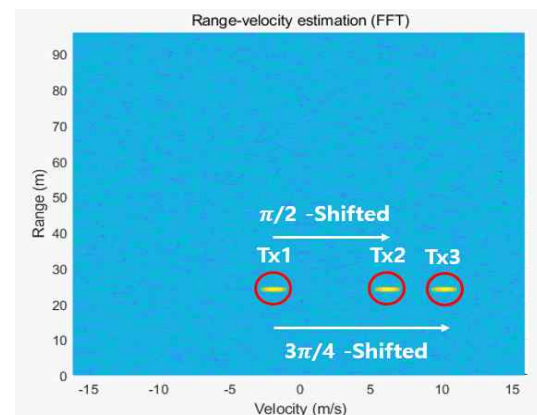


그림 2 MPSK-MIMO FMCW 시뮬레이션

II. 본론

2.1 CDM방식의 MPSK-MIMO FMCW 레이더

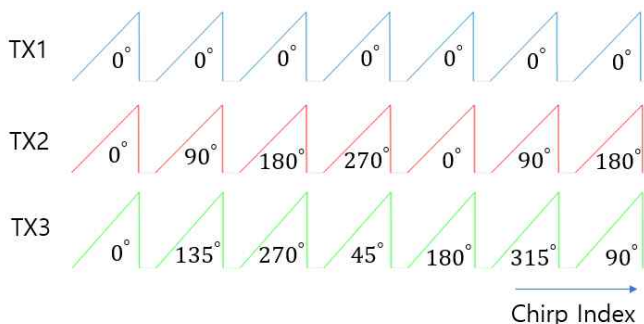


그림 1 MPSK-MIMO FMCW 레이더에서 각 Chirp 별 위상 천이

2.2 위상 천이기 오류 모델

이번 절에서는 2.1절에서 소개한 방식에서 위상 천이기의 오류로 인해 고스트 타겟이 발생하는 상황을 모델링하고 시뮬레이션한다. 2.1절과 같은 상황에서 Tx1, Tx2만 사용하는 상황을 가정하였으며 위상 천이를 가하기 전 Tx2의 각 Chirp 신호를 $s_M(t)$ 라고 하였을 때 (M : Chirp index) 위상 천이 오류를 포함한 신호 $s_{err,M}(t)$ 의 모델은 다음과 같다.

$$s_{err,M}(t) = s_M(t) \exp(j2\pi M/4 + \Delta\phi_{\text{mod}(M,4)} + \phi_{var,M})$$

여기서, $\Delta\phi_n$ ($n=0,1,2,3$)은 위상 천이 오류의 offset을 의미하고, $\phi_{var,M}$ 은 위상 천이 오류의 변동성을 의미한다. 임의로 $\Delta\phi_0 = 0$, $\Delta\phi_1 = 0.025$, $\Delta\phi_2 = -0.028$, $\Delta\phi_3 = -0.01$ 로 설정하였으며, ϕ_{var} 는 분산이 0.001인 가우시안 랜덤 변수로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 위상 천이 오류가 포함되지 않은 이상적인 모델에서는 그림3의 왼쪽 그림과 같이 피크가 두 개만 나타났지만, 위상 천이 오류를 포함한 모델에서는 그림3의 오른쪽 그림처럼 고스트 타겟이 나타난 것을 확인할 수 있었다.

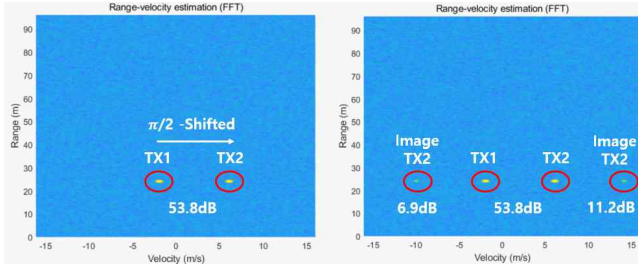


그림 3 위상 천이기 오류 모델 시뮬레이션 (좌:오류x, 우:오류o)

2.3 실측 데이터의 위상 정보 후처리 보정을 통한 고스트 타겟 완화

2.3절에서는 77GHz 대역의 FMCW 레이더를 이용한 실측 데이터를 통해 시뮬레이션 사실을 검증하고, 2.2 절에서 모델링한 위상 천이 오류 모델을 바탕으로 이를 후처리 보정해주어 고스트 타겟을 완화한다. 1.5m 거리에 정지한 코너 리플렉터를 비치하고 TI사의 AWR2243 레이더에 탑재되어있는 각 Chirp 별 위상 천이 기능을 사용하여 실험을 진행하였다. 오류 모델을 검증하기 위해 하나의 Tx만 이용하였으며 각 Chirp 별로 90도의 위상 천이를 가해 실험한 결과 그림5의 왼쪽 그림처럼 속도 영역에서 $\pi/2$ 만큼 천이된 곳에 155.3dB의 피크가 나타났으며 그 외 110dB 수준의 고스트 타겟이 나타났음을 확인할 수 있다.

위상 정보를 보정하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 각 Chirp마다 FFT하는 과정을 통해 코너 리플렉터로 인해 나타나는 거리 피크를 감지하고 각 거리 피크의 위상 정보를 Chirp 마다 구한다. 이상적으로 위상 천이가 일어났다면 연속한 Chirp의 피크 위상 정보는 $\pi/2$ 만큼 차이가 나야한다는 사실을 참고 기준으로 하여 위상 천이 오류 $\Delta\phi_{\text{mod}(M,4)} + \phi_{var,M}$ 를 그림 4와 같이 측정할 수 있다. 그 후, 위상 천이 오류를 평균 내는 과정을 통해 $\Delta\phi_n$ ($n=0,1,2,3$)를 각각 추정하고 역으로 곱해주는 과정을 거쳐 그림4와 같이 위상 정보를 보정하였다.

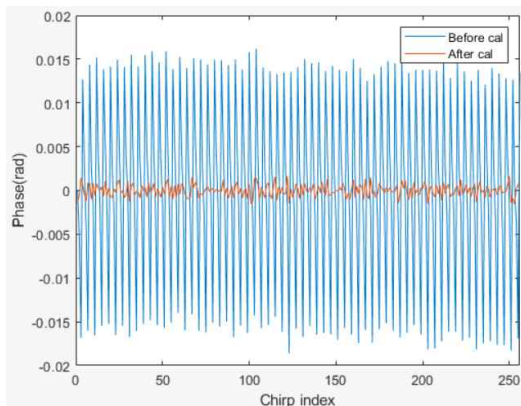


그림 4 위상 정보 보정결과

위상정보를 보정한 결과, 그림 5의 오른쪽 그림처럼 고스트 타겟의 피크값이 10dB 가까이 개선되었음을 확인할 수 있었다. 피크가 완벽하게 개선되지는 못했는데 이는 위상 천이기의 I/Q 불균형, Chirp마다 변동하는 위상 천이기의 오류 등 때문으로 생각되며, 이는 추후 정밀한 모델을 통해 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

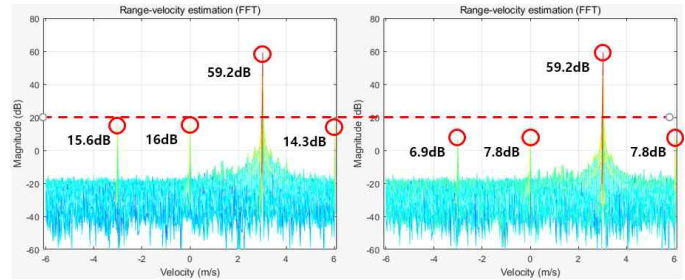


그림 5 위상정보 보정을 통한 고스트 타겟 완화 (좌: 보정 전, 우: 보정 후)

III. 결론

본 논문에서는 위상 천이기를 기반으로 Chirp마다 MPSK 코드를 삽입하는 CDM 방식의 MIMO-FMCW 레이더 시스템에서 위상 천이기의 오류를 모델링 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 위상 천이기의 오류가 고스트 타겟을 발생시킨다는 사실을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한, 77GHz 대역의 FMCW 레이더의 실측 데이터를 통해 위상 천이로 인한 고스트 타겟이 나타남을 확인하고, 위상정보 후처리 보정을 통해 위상 천이 오류를 최소화함으로써 고스트 타겟을 10dB 가까이 완화할 수 있음을 확인했다. 추후 위상 천이기의 I/Q 불균형 등을 반영한 정밀한 모델링을 통해 더 효과적으로 고스트 타겟을 완화시키는 기법을 제안하고자 하며, 이를 바탕으로 위 연구는 TDM 방식 혹은 BPM 방식의 MIMO-FMCW 레이더가 가지는 최대 탐지 속도의 감소 문제를 해결할 수 있는 MPSK-MIMO FMCW의 레이더의 구현을 위한 발판으로 삼을 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 현대오트모에버의 지원을 받아 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- [1] Zwanetski, Alex, and Hermann Rohling. "Continuous wave MIMO radar based on time division multiplexing." 2012 13th International Radar Symposium. IEEE, 2012.
- [2] Sit, Yoke Leen, et al. "BPSK-based MIMO FMCW automotive-radar concept for 3D position measurement." 2018 15th European Radar Conference (EuRAD). IEEE, 2018.
- [3] Sim, Heonkyo, et al. "Improved DOA estimation method by distinction of different transmit signals in automotive MIMO frequency-modulated continuous wave radar systems." IET Radar, Sonar & Navigation 14.8 (2020): 1135-1142.