

# QPSK 기반 MIMO FMCW 레이더 시스템에서의 도플러 모호성 해결에 관한 연구

김준호, 이성욱

중앙대학교

keemjuno@cau.ac.kr, seongwooklee@cau.ac.kr

## A Study on Resolving Velocity Ambiguity in QPSK-based MIMO FMCW Radar Systems

Kim Junho, Lee Seongwook

Chung-Ang Univ.

### 요약

본 논문은 quadrature phase-shift keying (QPSK) multiple-input and multiple-output (MIMO) frequency-modulated continuous wave (FMCW) 레이더 시스템에서 표적을 탐지할 때 발생하는 문제를 해결하기 위한 방법을 제안하였다. FMCW 파형의 각 처프에 위상을 부여하여 신호를 송신하게 되면 송신 신호에 곱해지는 코드의 스펙트럼에 의해 도플러 편이가 발생하여 표적의 속도 정보가 손실되는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 코드의 도플러 편이 패턴을 이용하여, QPSK 기반의 MIMO FMCW 레이더 시스템에서 발생하는 속도 모호성을 해결하는 방법을 제안하였으며, 제안하는 방법을 통해 표적의 속도 정보를 손실 없이 추정할 수 있다.

### I. 서론

최근 자율주행을 위한 인지 센서들의 기술이 발전함에 따라, 차량용 레이더 시스템에서는 높은 해상도로 물체의 각도 정보를 추정하기 위해 multiple-input and multiple-output (MIMO) frequency-modulated continuous wave (FMCW) 레이더 시스템을 주로 사용한다. MIMO FMCW 레이더 시스템에서 표적의 정보를 추정하기 위해서는 각 송신 안테나에서 전송된 신호가 수신단에서 구분되어야 하는데 이를 위해 time-division multiplexing (TDM), frequency-division multiplexing (FDM), code-division multiplexing (CDM) 등의 변조 기법들이 주로 사용된다. 그러나 TDM 기반의 MIMO FMCW 레이더 시스템의 경우 송신 안테나 성분의 수에 비례하여 표적의 최대 탐지 속도가 감소하는 단점이 존재하며[1], CDM 기반의 MIMO FMCW 레이더 시스템의 경우 송신 신호에 곱해지는 코드의 스펙트럼에 의해 도플러 편이가 발생하여 속도 정보가 손실되는 문제가 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 quadrature phase-shift keying (QPSK) 기반의 MIMO FMCW 레이더 시스템에서 발생하는 속도 모호성을 해결하는 방법을 제안한다.

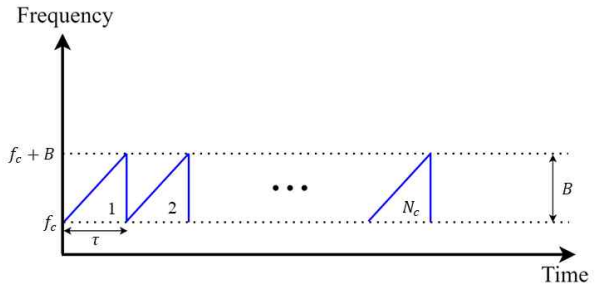


그림 1. FMCW 레이더 시스템에서의 송신 신호

본 논문에서는 아래와 같이  $90^\circ$ 의 위상 변화를 가진 4가지 위상 코드를 부여하는 방식인 QPSK 기반의 MIMO FMCW 레이더 시스템을 사용하며, 사용된 MIMO FMCW 레이더 시스템의 파라미터들은 표 1과 같다.

$$[00] = 0^\circ, [01] = 90^\circ, [10] = 180^\circ, [11] = 270^\circ. \quad (1)$$

### II. 본론

#### 가. QPSK 기반 MIMO FMCW 레이더 시스템

일반적으로 FMCW 레이더 시스템의 경우 그림 1과 같은 연속적인 처프 형태의 송신 신호를 사용한다. MIMO FMCW 레이더 시스템에서는 주로 신호를 시간 영역에서 분할하여 송출하거나, 송신 신호에 위상 코드를 부여하는 방법을 사용한다. 그러나 TDM 기반의 방식의 경우 송신 안테나 성분의 수에 따라 표적의 최대 탐지 속도가 감소하는 단점이 존재하며, 위상 코드를 부여하는 경우 코드의 스펙트럼에 의해 도플러 편이가 발생하여 표적의 속도 추정이 어렵게 된다[2].

파라미터	값
중심 주파수, $f_c$	77 GHz
대역폭, $B$	2 GHz
처프 길이, $\tau$	0.1 ms
처프 개수, $N_c$	256
송신 안테나 개수, $M$	4
수신 안테나 개수, $N$	16
표적 거리, $R$	20, 50, 70 m
표적 속도, $V$	4, 6, 9 m/s
최대 탐지 속도, $V_{\max}$	9.74 m/s

표 1. 레이더 시스템 파라미터와 그 값

제안하는 QPSK 기반 MIMO FMCW 레이더 시스템에서는 서로 직교하는 4개의 QPSK 코드를 사용하며, 송신 안테나에서 사용되는 코드는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} QPSK_{T_{x2}} &= [00, 01, 10, 11], \\ QPSK_{T_{x3}} &= [01, 10, 11, 00], \\ QPSK_{T_{x4}} &= [10, 11, 00, 01], \\ QPSK_{T_{x4}} &= [11, 00, 01, 10]. \end{aligned} \quad (2)$$

각 송신 안테나 성분에서 사용되는 QPSK 코드는 4개의 처프 단위로 송신 신호에 부호화된다. 본 논문에서 사용한 레이더 시스템의 처프 개수가 256 개이므로, 길이가 4인 직교 위상 코드들을 연속으로 64번 이어붙인 코드가 곱해지는 형태이며 이는 그림 2에 나타난다.

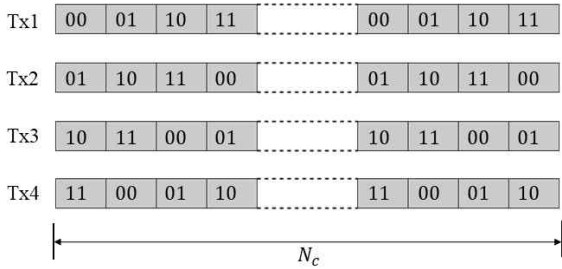


그림 2. 송신 안테나에서 사용하는 직교 위상 코드

그림 3은 (2)의 코드를 사용하여 송신 신호를 부호화한 뒤의 수신단 측에서의 거리-속도 평면에서의 표적 탐지 결과를 나타낸다. 송신 안테나 성분에 곱해지는 직교 위상 코드에 의해 표적의 속도 정보가  $V_{\max}/2$ 만큼 이동된 위치에 나타나는 것을 확인할 수 있다.

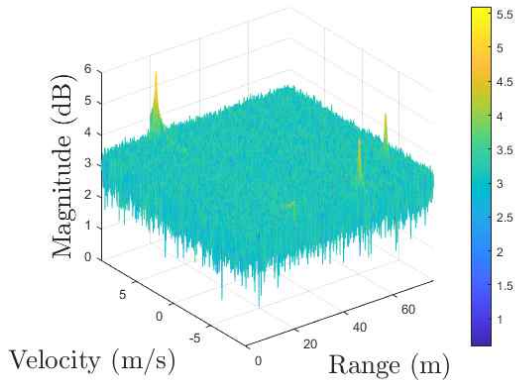


그림 3. 수신단 측 거리-속도 평면 표적 탐지 결과

나. 제안하는 속도 모호성 해결 방법

본 논문에서는 표적 탐지의 속도 모호성을 위해 아래와 같은 새로운 직교 위상 코드를 수신단에서 복호화하는 방법을 사용한다.

$$QPSK_{R_x} = [00, 11, 10, 01]. \quad (3)$$

송신 안테나 성분에 부여된 4개의 코드의 경우 속도가  $V_{\max}/2$ 만큼 편이 되는 패턴을 보이는 코드이다. 따라서 표적의 속도 정보를 복원하기 위해 속도가  $-V_{\max}/2$ 만큼 이동하는 도플러 편이 패턴을 갖는 코드인

$QPSK_{R_x}$ 를 사용하여 수신 신호를 복호화하면, 표적의 속도 모호성을 해결할 수 있다.  $QPSK_{R_x}$ 를 사용하여 복호화한 신호의 거리-속도 평면 표적 탐지 결과는 그림 4와 같다. 그림 4에 나타난 표적의 속도 정보는 각각 4, 6, 9 m/s로 모호성을 해결하여 실제 표적의 속도 정보를 추정할 수 있다.

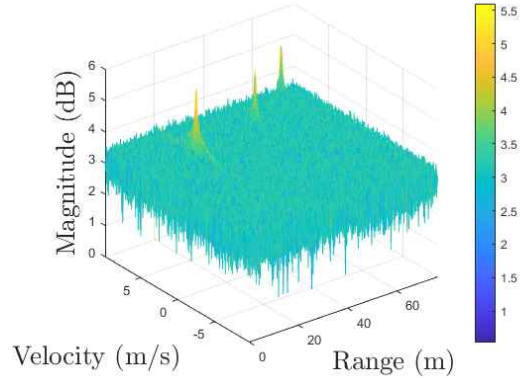


그림 3. 제안하는 복호화 방법을 적용한 거리-속도 평면 표적 탐지 결과

### III. 결론

본 논문에서는 QPSK 기반의 MIMO FMCW 레이더 시스템에서 발생하는 도플러 편이에 의한 속도 모호성 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 송신 안테나 성분에 부여되는 코드들의 도플러 편이 양상과 반대되는 입의 코드를 사용하여 수신 신호를 복호화하는 방식을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 거리-속도 평면에서 표적의 속도 모호성을 해결할 수 있음을 검증하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1065247).

### 참고 문헌

- [1] X. Li, X. Wang, Q. Yang, and S. Fu, "Signal processing for TDM MIMO FMCW millimeter-wave radar sensors," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167959–167971, December 2021.
- [2] C. Sturm, Y. L. Sit, G. Li, H. A. Vayghan, and U. Lübbert, "Automotive fast-chirp MIMO radar with simultaneous transmission in a Doppler-multiplex," *19th International Radar Symposium (IRS)*, Bonn, Germany, June 2018, pp. 1–6.