

# 차세대 자율주행을 위한 79GHz MIMO PMCW 레이더 시스템

김소람, 함도영, 김성철

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소

{srkim523, wj2dy, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

## 79GHz MIMO PMCW Radar System for Next Generation Autonomous Driving

Soram Kim, Doyoung Ham, Seong-Cheol Kim

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

### 요약

PMCW(Phase Modulated Continuous Wave) 레이더는 넓은 대역폭과 빠른 ADC의 요구 사항으로 인해서 차량용 레이더로는 주목받지 못하였지만, 최근 single-chip PMCW 구현이 가능해짐에 따라 PMCW 레이더가 차량용 레이더로 주목받고 있다. 본 논문은 79GHz 차량용 레이더 시스템에서 FMCW와 PMCW 레이더의 시스템 레벨의 비교를 하고, PMCW 레이더의 MIMO processing을 위한 기술로, outer code를 통하여 송신단의 orthogonality를 만족시키는 방법에 대하여 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 MIMO PMCW 레이더의 거리-속도 맵과 각도 추정 성능 및 특징을 확인하고 차세대 레이더 시스템으로서의 가능성을 확인한다.

### I. 서론

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더는 좁은 bandwidth를 가지는 비트 신호를 샘플링 하기 때문에 저렴한 ADC를 사용할 수 있어 자율주행 시스템을 위한 차량용 레이더로 널리 사용되어 왔다. 반면에 PMCW(Phase Modulated Continuous Wave) 레이더는 넓은 대역폭과 빠른 ADC의 요구 사항으로 인해 차량용 레이더로는 주목받고 있지 않았다. 최근에는 이런 빠른 ADC 요구를 만족하는 CMOS 기술이 발전됨에 따라 single-chip PMCW 구현이 가능해졌고, 따라서 PMCW 레이더에 관한 연구들이 진행되고 있다 [1].

본 논문에서는 79GHz 차량용 레이더 시스템에서 FMCW와 PMCW 레이더의 시스템 레벨의 비교를 하고, PMCW 레이더의 MIMO processing을 위한 기술로, outer code를 통하여 송신단의 orthogonality를 만족시키는 방법에 대하여 제안한다. 시뮬레이션을 통해 PMCW 레이더의 거리-속도 맵과 각도 추정 성능을 확인하고 차세대 레이더 시스템으로서의 가능성을 확인한다.

### II. 본론

#### 2.1 PMCW 레이더와 FMCW 레이더의 비교

FMCW 레이더는 주파수를 선형적으로 증가시킨 처프 신호를 사용하는 주파수 모듈레이션 방법을 사용한다(그림1-a). 반면 PMCW 레이더는 RF 캐리어 신호에 페이즈를 0도와 180도로 주는 이진 페이즈 모듈레이션 기법을 사용한다(그림1-b).

PMCW 레이더는 CDM(Code Division Multiplexing) 방식을 사용하기 때문에 적절한 코드 선택을 통하여 여러 가지 장점을 취할 수 있다. FMCW 레이더에서 FFT 기반으로 거리를 추정하는 방식과 달리, PMCW 레이더에서는 correlation 기반으로 거리를 추정하기 때문에 샤프한 피크를 추출할 수 있고 사이드로브 레벨이 낮기 때문에 거리-도플러 호환성이 적고 높은 성능을 가진다. 또한 코드 도메인에서 MIMO 구현이 가능하여 제한된 안테나 aperture에서 높은 각도 추정 해상도를 가진다. 또한 코드 도메인의 모듈레이션 방식을 통하여 간섭에 강한 특징을 가진다.

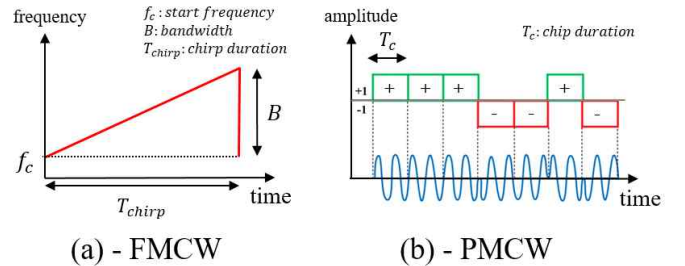


그림1. FMCW 레이더와 PMCW 레이더의 파형 비교

#### 2.2 PMCW 모델

PN(pseudo-noise) 시퀀스를 chip 간격  $T_c$ 로 샘플링 한 chip index를  $m$ , 시퀀스의 길이를  $M$  이라고 할 때 디지털 송신 신호를 나타내면 식(1)과 같다.

$$c[m] = \pm 1 \quad (0 \leq m \leq M-1) \quad (1)$$

수신 신호는 송신 신호의 지연 버전이라 할 수 있으며 지연된 index를  $m_0$ 라고 할 때  $l$ 번째 시퀀스의  $m$ 번째 칩의 2D 디지털 수신 신호를 나타내면 식(2)와 같다.

$$x[m, l] = Ac[m - m_0] \exp(j2\pi(f_D MT_c l + f_D T_c m)) \quad (2)$$

$MT_c$  길이의 시퀀스를 보내는 동안 타겟의 움직임에 의해 도플러 주파수  $f_D$ 가 생기게 되는데 이 페이즈 차이를 이용해 식(3)과 같이 속도  $v$ 를 추정할 수 있으며 correlation을 통해 지연 index  $m_0$ 를 알아내 식(4)와 같이 거리  $R$ 를 추정할 수 있다.

$$\hat{v} = \frac{c}{2f_c} \hat{f}_d, \hat{R} = \frac{c T_c \hat{m}_0}{2} \quad (3),(4)$$

각도 추정을 위한 MIMO-PMCW 시스템에서  $k$  번째 수신 안테나의  $l$  번째 시퀀스의  $m$  번째 칩 3D 디지털 수신 신호를 모델링 하면 식(5)와 같다.

$$x[m, l, k] = \left( \sum_{n=0}^{N-1} A_n c_n [m - m_0] \exp(j2\pi(f_D MT_c l + f_D T_c m + \frac{d_n \sin\theta}{\lambda} n)) \right) \exp(j2\pi \frac{d_k \sin\theta}{\lambda} k) \quad (5)$$

$N$  은 송신 안테나의 개수,  $d_n$  은 송신 안테나 간격,  $d_k$  는 수신 안테나 간격을 나타내며, 송신 안테나 개수  $N$  만큼 신호가 중첩되어 들어오게 된다. 송신 안테나 간격에 의해  $\frac{j2\pi d_n \sin\theta}{\lambda} n$ , 수신 안테나 간격에 의해  $j2\pi \frac{d_k \sin\theta}{\lambda} k$  만큼의 페이즈 차이가 발생하게 되는데, 가상 안테나 배열을 통해 각도  $\theta$  를 추정할 수 있다.

### 2.3 PMCW MIMO 레이더

FMCW 레이더에서는 송신단 간의 orthogonality를 만족시키기 어렵기 때문에 송신단 마다 다른 시간에 처프 신호를 보내는 TDM(Time Division Multiplexing) 방식을 주로 사용한다. 이는 한 송신단에서 다음 처프를 보내기까지의 처프 간격이 길어지게 만들어서, 최대 탐지 속도가 줄어드는 문제점이 있다.

반면에 PMCW 레이더에서는 CDM 방식을 사용하기 때문에 코드 도메인에서 orthogonality 디자인이 가능하여 송신 안테나가 동시에 신호를 보낼 수 있고, 이로 인해 SNR을 높일 수 있으며, 다중 안테나로 인하여 aperture가 넓어져 높은 해상도로 각도를 추정할 수 있다.

$4 \times 4$  MIMO PMCW 레이더 시스템에서, 송신단의 orthogonality를 가능하게 하는 방법으로, 같은 시퀀스를 이용하되 outer code를 이용해서 orthogonality를 만족하게 하는 방법을 제안한다. 식(6)의 Hadamard 행렬  $H$  은 +1과 -1로 구성되어 있고 각각의 행들이 직교한 벡터로 구성되어 있다. Hadamard 행렬을 이용하여 송신단 신호들이 서로 직교하도록 함으로써 송신단에서 동시에 신호를 보낼 수 있도록 한다.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표1과 같으며,  $4 \times 4$  MIMO의 안테나 배열은 그림2와 같다. TX 안테나 간의 간격  $d_n = 2\lambda$ , RX 안테나 간의 간격  $d_k = 0.5\lambda$ 로 설정되었다.

표 1. PMCW 시뮬레이션 파라미터

| 파라미터                       | 값            | 파라미터           | 값          |
|----------------------------|--------------|----------------|------------|
| 중심주파수 $f_c$                | 77GHz        | 거리 분해능         | 0.3m       |
| 송수신 안테나 수 ( $N \times K$ ) | $4 \times 4$ | 속도 분해능         | 0.94m/s    |
| 칩 간격 $T_c$                 | 2ns          | 타겟 거리 $R$      | 20m        |
| 칩 개수 $M$                   | 256          | 타겟 속도 $v$      | 12m/s      |
| 시퀀스 개수 $L$                 | 256          | 타겟 각도 $\theta$ | $30^\circ$ |

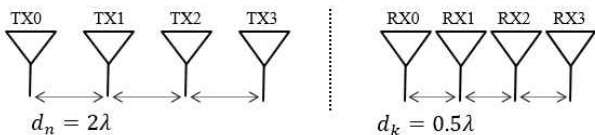


그림 2.  $4 \times 4$  MIMO 안테나 배열

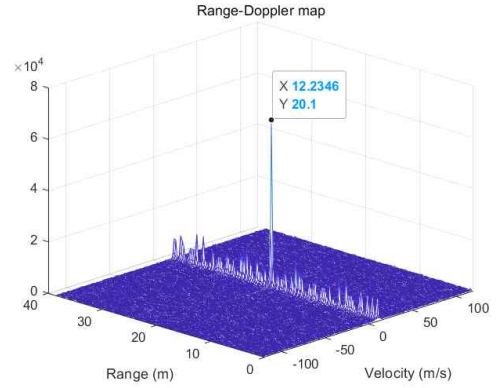


그림 3. Range-Doppler map 시뮬레이션 결과

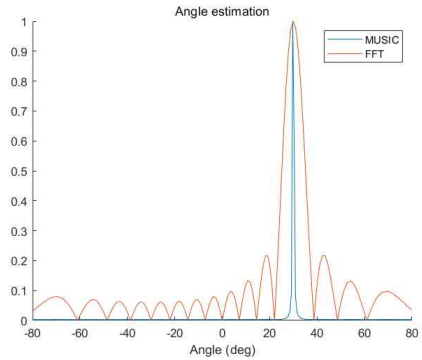


그림 4. 각도 추정 시뮬레이션 결과

그림3의 Range-Doppler map 시뮬레이션 결과 속도 12m/s와 거리 20m에서 thumbtack-like 피크 모양을 확인할 수 있다. PMCW 레이더의 correlation 기반의 거리 추정 방식을 통해 FMCW 레이더에 비해 낮은 사이드 로브 특성 및 높은 SNR을 가진다. 그림4는 각도 추정 시뮬레이션 결과를 MUSIC 기법과 FFT 기법을 통해 나타낸 것이다. FFT 사이즈는 128로 설정되었고, 타겟의 각도  $30^\circ$  에서 피크가 뜨는 것을 확인할 수 있다.  $4 \times 4$  MIMO 안테나 배열을 통한 16개의 가상 안테나로 인하여 높은 각도 분해능을 가짐을 확인하였다.

### III. 결론

본 연구에서는 차량용 레이더 시스템을 위한 PMCW 레이더 시스템을 모델링 하였으며 이를 FMCW 레이더와 비교하였다. MIMO PMCW 레이더의 송신단에서 신호를 동시에 보내기 위하여, outer code를 이용해 orthogonality를 만족시키는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 PMCW 레이더의 특징과 코드 도메인에서의 장점을 확인하였으며, 차세대 차량용 레이더 시스템으로서의 가능성을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20014098).

### 참고 문헌

[1] Bourdoux, A., Ahmad, U., Guermendi, D., Brebels, S., Dewilde, A., & Van Thillo, W. (2016, May). PMCW waveform and MIMO technique for a 79 GHz CMOS automotive radar. In 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf) (pp. 1-5). IEEE.