

Reduced-CP OTFS 신호파 기반 통신-레이더 양립 시스템의 향상된 센싱 성능

박정훈, 김성철

서울대학교 뉴미디어 통신 공동연구소

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

Enhanced Sensing Performance of Integrated Sensing and Communication Systems based on Reduced-CP OTFS Waveform

Jeong-Hoon Park, Seong-Cheol Kim

Institute of New Media and Communications (INMC), Seoul National University (SNU)

요약

본 논문은 ISAC (Integrated sensing and Communication) 시스템에서 고려되는 OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) 신호파와 OTFS (orthogonal time frequency space) 신호파의 센싱 성능을, 타겟의 속도와 거리에 의해 발생하는 ICI (Inter-carrier Interference)와 ISI (Inter-symbol Interference)를 중심으로 비교 분석하고, reduced-CP (cyclic-prefix)를 활용하는 시스템에서 향상된 센싱 성능을 확보할 수 있음을 보인다. 본 논문에서 제시하는 reduced-CP OTFS 신호파 기반 통신-레이더 양립시스템은 데이터 심볼을 delay-Doppler (DD) 영역에 매핑하고, 2차원 영역에서의 등화를 수행함으로써 겹친 통신 및 센싱 성능을 확보할 수 있으며, CP를 매 심볼마다 반복하지 않아 프레임 설계에서 큰 장점을 갖는다. 본 논문에서 제시하는 신호파간 성능 비교를 통해 ISAC 시스템에서 적합한 과정 선택 가이드라인을 제시하고자 한다.

I. 서론

통신과 센싱을 동시에 수행하는 ISAC(integrated sensing and communication) 기술 수요가 6G의 새로운 키워드로 부상하고 있으며, 이를 위해 데이터 전송과 환경 센싱을 함께 효율적으로 지원하는 과정 설계가 요구된다. 기존 통신 인프라와의 높은 호환성, 높은 전송률, fast Fourier transform (FFT) 기반의 단순한 하드웨어 구조 덕분에 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 기반 ISAC이 활발히 연구되고 있지만, 고이동성 환경에서는 ICI (Inter-carrier interference)에 민감하다는 한계가 있다 [1]. 대안으로 제안된 OTFS (orthogonal time frequency space) 변조 기법은 심볼을 delay-Doppler (DD) 영역에서 변조함으로써 일정한 도플러 이동을 갖는 시간 가변 채널을 시간 불변한 채널처럼 다루고, 적은 수의 CP를 사용하는 프레임 구조를 통해 고속 이동 표적 센싱에 유리한 특성을 보인다 [2]. 이러한 장점에도 불구하고 OTFS는 등화/채널 추정 복잡도, 프레임 설계 등의 실용적 이슈가 남아 있어, ISAC 관점에서 OFDM과의 성능·복잡도 절충을 체계적으로 비교·분석할 필요가 있다.

II. 본론

(1) 각 신호파 별 송신 신호 모델

본 논문에서는 송신기와 수신기가 reference 신호를 서로 공유한다고 가정한다. 이는 monostatic 레이더 시스템에서는 일반적인 상황이며, bistatic 레이더 시스템의 경우 센싱에 필요한 reference 신호를 할당하는 상황이라고 볼 수 있다. 가상 부반송파, DC성분을 고려한 null 반송파, windowing, 그 외 PAPR (peak to average power ratio)과 관련된 하드웨어 이슈 등을 모델링에서 제외하고, 이상적인 OFDM 혹은 OTFS 신호파를 송수신할 때의 센싱 성능을 비교한다. 본 논문에서 상정하는 OFDM 시스템의 baseband 신호는 다음과 같이 모델링 된다 [1].

$$x_{OFDM}(t) = \sum_{m=0}^{N_s-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} \frac{X_{OFDM}[n,m]}{\sqrt{N_c}} e^{j2\pi\Delta f(t-mT_s)} r\left(\frac{t}{T_s} - m\right) \dots(1)$$

이때, N_s , N_c , T_s , Δf , $X_{OFDM}[n,m]$, $r(\cdot)$ 은 각각 한 프레임 내 심볼 개수, 한 심볼 내 부반송자파의 개수, CP를 포함한 OFDM 심볼 길이, 부반송자파간 간격, n번째 부반송자파와 m번째 심볼에 해당하는 데이터 심볼, 사각파 함수를 나타낸다. 모든 심볼마다 CP가 추가되는 Full-CP OFDM 시스템의 송신신호 $s_{OFDM}(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s_{OFDM}(t) = \begin{cases} x(t+T_s), & \text{if } 0 \leq \frac{t}{T_s} - \lfloor \frac{t}{T_s} \rfloor < 1 - \frac{T}{T_s} \\ x(t), & \text{else} \end{cases} \dots(2)$$

이때, $T (= 1/\Delta f)$ 를 나타내며 CP의 길이 T_{CP} 에 대하여

$T_s = T + T_{CP}$ 로 표현된다.

본 논문에서 상정하는 OTFS 시스템의 baseband 신호는 다음과 같이 모델링 된다.

$$x_{m,OTFS}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_{OTFS}[n,m] e^{j2\pi n \Delta f t} r\left(\frac{t}{T}\right) \dots(3)$$

이때, $N (= N_c)$, $M (= N_s)$ 은 각각 delay 영역과 Doppler 영역의 grid 수를 의미한다. DD 영역에서 변조되는 데이터 심볼 $X^{DD} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 는 inverse symplectic finite Fourier transform에 의해서 시간-주파수 영역 데이터 심볼 $X_{OTFS} = F_N X^{DD} F_M^H$ 로 변환된다. 여기에 매 심볼마다 CP가 추가되는 것이 아닌, 한 프레임에만 CP가 추가되는 Reduced-CP OTFS 시스템의 송신신호 $s_{OTFS}(t)$ 는 다음과 같이 표현된다 [2].

$$s_{OTFS}(t) = r\left(\frac{t}{MT}\right) \sum_{m=0}^{M-1} x_{m,OTFS}(t-mT) + r\left(\frac{t+T_{CP}}{T_{CP}}\right) \sum_{m=0}^{M-1} x_{m,OTFS}(t+MT-mT), -T_{CP} \leq t \leq MT \dots(4)$$

(2) 레이더 채널 모델

한 프레임 내에서 타겟의 거리, 속도, 레이더 반사 면적은 일관된다고 가정하며 협대역 시변 레이더 수신신호 채널을 가정하면, K 개의 타겟으로부터 반사되어 수신되는 down-conversion 후의 baseband 신호는 노이즈 $z(t)$ 를 포함하여 다음과 같이 표현된다.

$$y(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k e^{j2\pi\nu_k t} s(t - \tau_k) + z(t) \quad \dots(5)$$

이때, $s(t)$ 는 $s_{OFDM}(t)$ 혹은 $s_{OTFS}(t)$ 를 대변하며, α_k , ν_k , τ_k 는 각각 k 번째 타겟의 복소 채널 이득, 도플러 변이 주파수, 왕복 전파 딜레이를 의미한다. 이때, 타겟의 왕복 전파 딜레이는 T_{CP} 를 넘지 않는다고 가정한다. CP를 제거하고 샘플링 된 관측 벡터를 $\vec{y} \in \mathbb{C}^{NM \times 1}$, 이를 reshape한 행렬을 Y , CP를 제거한 송신 신호 벡터를 $\vec{s} \in \mathbb{C}^{NM \times 1}$ 라고 표현한다.

(3) OFDM 레이더의 수신신호 모델과 2D-FFT기반 신호처리 기법

먼저 OFDM 레이더 수신 신호 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$Y = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k D_{N_c} \left(\frac{\nu_k}{N_c \Delta f} \right) F_{N_c}^{-1} D_{N_c}^H (T\tau_k) X_{OFDM} D(T_s \nu_k) + Z \quad \dots(6)$$

이때, $D_a(f) = \text{diag}\{1 e^{j2\pi f}, e^{j4\pi f}, \dots, e^{j2\pi(a-1)f}\}$ 를 의미한다. 위의 수신신호 모델에서 D 행렬은 순서대로 한 심볼 내에서 도플러 위상 변이로 인한 ICI, 신호의 딜레이, 심볼마다 나타나는 도플러 위상 변이를 나타낸다. 따라서, 두 번째와 세 번째 D 행렬을 이용하여 타겟의 거리와 속도를 각각 추정한다. 이 과정은 2D-FFT로 표현될 수 있으며 수식적으로는 다음과 같다 [1].

$$G_1 = F_{N_c}^{-1} ((F_{N_c} Y) \otimes X_{OFDM}) F_{N_s} \quad \dots(7)$$

이때 \otimes 는 element-wise division을 나타낸다.

(4) OTFS 레이더의 수신신호 모델과 두 가지 신호처리 기법
마찬가지로 식 (6)과 같이 모델링 하였을 때, OFDM 레이더와 마찬가지로 2D-FFT 기반 거리-속도 추정을 수행할 수 있다. 이를 통해 얻어진 거리 속도 스펙트럼을 G_2 라고 표현하며, 식 (7)에서 X_{OFDM} 대신 X_{OTFS} 를 활용하여 얻을 수 있다. 하지만, OTFS 시스템은 reduced-CP 시스템을 상정하였으므로 이와 같은 기법을 사용하는 경우 연산량은 적지만, ISI가 발생하여 타겟 센싱 성능이 현저히 열화된다.

이를 보완하기 위해 [3]에서 제안하는 다음의 수신 신호 모델을 활용할 수 있다.

$$\vec{y} = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k D_{NM} \left(\frac{\nu_k}{N\Delta f} \right) F_{NM}^H D_{NM} (MT\tau_k) F_{NM} \vec{s} + \vec{z} \quad \dots(8)$$

해당 식 (8)의 수신신호 모델을 기반으로 MF (Matched filter)를 통해 타겟의 거리와 속도를 추정하며, 각 거리와 속도에 해당하는 딜레이, 도플러 값에 해당하는 거리-속도 스펙트럼은 다음과 같이 주어진다.

$$H(\nu, \tau) = \left(D_{NM} \left(\frac{\nu}{N\Delta f} \right) F_{NM}^H D_{NM} (MT\tau) F_{NM} \vec{s} \right)^H \vec{y} \quad \dots(9)$$

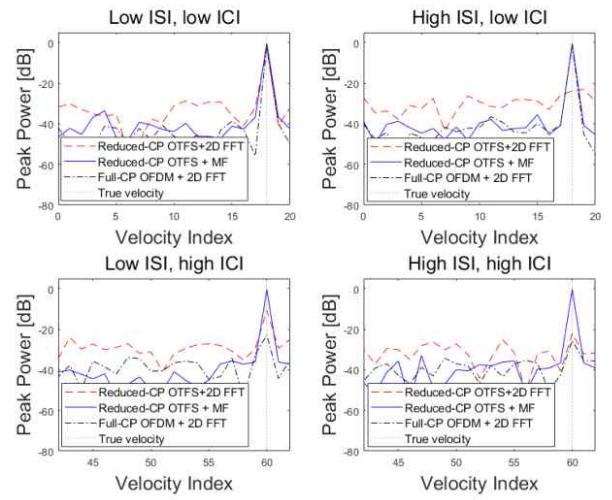
(5) 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표1과 같다. 타겟의 거리에 따른 ISI와 속도에 따른 ICI가 레이더 센싱 성능에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 각각의 영향이 작고 큰 경우 2가지 조합, 총 4가지 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 식(9)의 MF 기반의 거리-속도 추정 기법은 reduced-CP 시스템을 사용하였음에도 불구하고 ISI나 ICI에 의해 타겟 센싱성능이 열화되지 않는다는 것을 확인할 수

있다. 그에 반면, 2D-FFT를 사용하는 Reduced-CP OTFS 레이더 시스템은 높은 ISI 혹은 ICI에 의해 타겟의 센싱 성능이 급격히 열화되고, Full-CP OFDM 레이더의 경우는 ICI에 의해서만 타겟의 센싱 성능이 열화됨을 확인할 수 있다.

문자	의미	값
f_c	중심주파수	60 GHz
$N = N_c$	반송자파의 수	64
$\Delta f = 1/T$	반송자파간 간격	781.3 kHz
T	심볼 길이	1.28 μs
$N\Delta f$	대역폭	50 MHz

표 1 OFDM/OTFS 레이더 시뮬레이션 파라미터



III. 결론

본 논문에서는 OFDM 신호파와 OTFS 신호파의 센싱 성능에 대해 ISI와 ICI를 중심으로 수신신호를 모델링하고 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 기존 ICI에 취약한 OFDM 신호파와 기반 센싱 시스템의 근본적인 한계를 OTFS 신호파 기반 센싱 시스템으로 해결할 수 있음을 확인하였다. 하지만, 이를 위해서는 2D-FFT 대비 더 많은 연산량을 필요로 하는 MF를 활용해야 하며, OTFS는 프레임별 신호처리를 수행하므로 높은 지연시간을 초래 한다. 앞으로의 연구에서는 OTFS 시스템의 위 문제점들을 해결할 수 있는 신호처리 기법들에 대해 연구를 수행하고자 하며, 해당 결과는 ISAC 시스템에서의 센싱에 적합한 파형을 선택하는 데 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2025년 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 원에 의한 연구임(20014098).

참 고 문 헌

- [1] J.-H Park, et al. "Intercarrier Interference Mitigation for Communication Compatible OFDM Radar." IEEE Transactions on Vehicular Technology 73.4 (2023): 5930-5934.
- [2] R. Hadani, et al. "Orthogonal Time Frequency Space Modulation." 2017 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC). IEEE, 2017.
- [3] M. F. Keskin, et al. "Integrated Sensing and Communications with MIMO-OTFS: ISI/ICI Exploitation and Delay-Doppler Multiplexing." IEEE Transactions on Wireless Communications 23.8 (2024): 10229-10246.