Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 OFDM기반 통합 탐지 및 통신 시스템

이하은, 이영석, 정방철

충남대학교

haeunlee@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

OFDM-Based Integrated Sensing and Communication System with Zadoff-Chu Sequences

Ha-Eun Lee, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Cungnam National University

요 약

본 논문에서는 단말이 직교 시퀀스의 인덱스를 변조 신호로 활용하여 기지국과 통신하고, 동시에 기지국은 수신 시퀀스의 인덱스를 탐지하고 다중안테나를 활용한 방향 탐지를 수행하여 단말의 위치를 측위하는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반의 통합 탐지 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템을 제안한다. 구체적으로, 단말은 우수한 시간 영역 직교성을 갖는 시퀀스를 활용하여 송신할 비트에 매핑되는 시퀀스를 선택하여 전송한다. 이후, 기지국은 송신한 시퀀스를 탐지하고, 시퀀스의 직교성을 이용하여 가시선(line-of-sight: LoS) 경로에 해당되는 신호 성분을 추출한 뒤 해당 신호에 대한 방향 탐지를 수행한다. 모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 OFDM 기반 ISAC 시스템의 통신 및 측위 성능을 검증한다.

Ⅰ. 서 론

한정된 주파수 자원의 효율성을 증가시키기 위해 최근 탐지 및 통신 서비스를 동일한 자원 및 하드웨어를 공유하여 제공하는 통합 탐지 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 서비스가 차세대 이동통신에서 각광받고 있다 [1]. 이러한 ISAC 시스템은 동일한 자원으로 서로 상이한 두 서비스를 동시에 제공함에 따라 탐지 및 통신 성능 트레이드-오프(trade-off), 웨이브폼 디자인, 하드웨어 복잡도와 같은 다양한 문제점을 해결하기 위한 신호 처리 연구가 필요한 실정이다 [2]. 구체적으로, [3]에서는 통신과 탐지에 서로 다른 신호를 사용하며 연속 간섭 제거(successive interference cancellation; SIC)를 통해 신호를 구분하는 ISAC 시스템을 제안하였으나, SIC 과정의 복잡성과 오류 확산 등의 문제로 하나의 통합된 신호를 이용한 ISAC 시스템 연구가 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 우수한 신호 자기 상관성 및 시간 영역 직교성을 보이는 CAZAC(constant amplitude zero autocorrelation) 시퀀스인 Zadoff-Chu(ZC) 시퀀스를 이용한 ISAC 시스템을 제안한다. 구체적으로, 전파 지연 및 다중 경로 신호에 강인하도록 생성된 여러개의 후보 ZC 시퀀스 중 단말은 전송할 비트를 후보 ZC 시퀀스 개수에 대응되도록 분할하여 ZC 시퀀스 인덱스에 매핑시킨다. 이후 단말은 전송할 비트열에 대응되는 ZC 시퀀스를 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 방식을 통해 기지국으로 전송하고, 기지국은 수신한 ZC 시퀀스의 인덱스를 탐지하여 단말이 전송한 패킷을 검파한다. 이후, 기지국은 수신한 ZC 시퀀스의 직교성을 이용하여 전파 지연 정보와 가시선(line-of-sight: LoS) 경로에 해당되는 신호 성분을 추출하고 LoS 신호에 대한 방향 탐지를 수행하여 단말의 위치를 추정한다. 최종적으로 모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 시스템의 통신 및 측위 성능을 검증한다.

Ⅱ. 직교 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 사용자와 J개의 다중안테나 기지국을 고려한다. 편의상 기지국은 $x-y$ 평면상 원점에 위치한다고 가정하였으며, 단말은 기지국으로부터 양의 각도 θ와 거리 R 만큼 떨어져 있는 $(x,y)=(R\cos\theta,R\sin\theta)$ 좌표에 고정되어 있다고 가정하였다. 이때, 기지국은 단말의 위치 및 방향에 대한 사전 정보가 없다고 가정하였다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 사용자와 J개의 다중안테나 기지국을 고려한다. 편의상 기지국은 $x-y$ 평면상 원점에 위치한다고 가정하였으며, 단말은 기지국으로부터 양의 각도 θ와 거리 R 만큼 떨어져 있는 $(x,y)=(R\cos\theta,R\sin\theta)$ 좌표에 고정되어 있다고 가정하였다. 이때, 기지국은 단말의 위치 및 방향에 대한 사전 정보가 없다고 가정하였다.

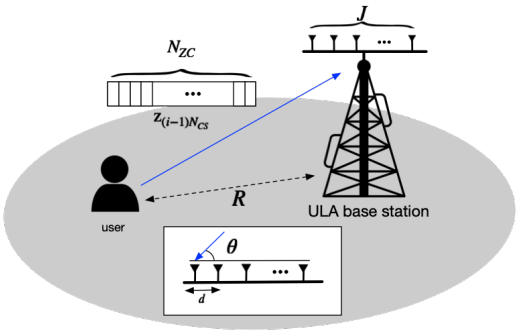

그림 1. 직교 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 대표적인 CAZAC 시퀀스 중 하나인 ZC를 이용한 인덱스 변조 통신 및 측위 절차를 수행한다. 구체적으로, 주어진 루트 r과 홀수 시퀀스 길이 N_{ZC}에 대해 다음과 같이 ZC 시퀀스 $\mathbf{z}_0=[z(0),z(1),\cdots z(\mathrm{N_{ZC}}-1)]^{\mathrm{T}}$를 생성할 수 있으며 이때 $n\in\{0,\ldots,N_{ZC}-1\}$째 시퀀스 원소 $z_0(n)$은 다음과 같다 [4].

$$z_0(n)=e^{-j\frac{\pi rn(n+1)}{N_{ZC}}}.$$

본 논문에서는 셀 간 간섭을 고려하지 않으므로 상이한 루트에 대한 ZC 시퀀스는 고려하지 않으며 루트 r에 대한 인덱싱은 편의상 생략하였다. ZC 시퀀스는 동일한 루트를 갖는 시퀀스에 대해 순환 이동(circular shift)한 시퀀스와 서로 직교하는 특성을 갖는다. 따라서, 주어진 이동 계수 N_{CS}에 대해 $M=\lfloor N_{ZC}/N_{CS}\rfloor$ 개의 서로 직교하는 후보 ZC 시퀀스 집합 Z를 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$Z=\left\{\mathbf{z}_0,\mathbf{z}_{\mathrm{N_{CS}}},\cdots,\mathbf{z}_{(\mathrm{M}-1)\mathrm{N_{CS}}}\right\}.$$

그림 2는 본 논문에서 고려하는 OFDM 기반 직교 시퀀스 전송 절차를 도시하였다. 시간 영역에서 생성한 임의의 $i(\in\{1,\cdots,M\})$째 ZC 시퀀스 $\mathbf{z}_{(\mathrm{i}-1)\mathrm{N_{CS}}}$는 OFDM 전송을 위해 N_{ZC} 사이즈의 discrete Fourier transform (DFT)을 수행하여 OFDM 부반송파(subcarrier)에 매핑한다 [4]. 이후, N_{FFT} 사이즈의 inverse fast FT (IFFT)를 수행한 신호 $\hat{\mathbf{x}}(\in\mathbb{C}^{\mathrm{N_{FFT}}})$은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}=\mathrm{IFFT}_{\mathrm{N_{FFT}}}\left(\mathrm{DFT}_{\mathrm{N_{ZC}}}\left(\mathbf{z}_{(\mathrm{i}-1)\mathrm{N_{CS}}}\right)\right)$$

단말은 최종적으로 길이 N_{CP}를 갖는 cyclic prefix (CP)를 첨부한 신호

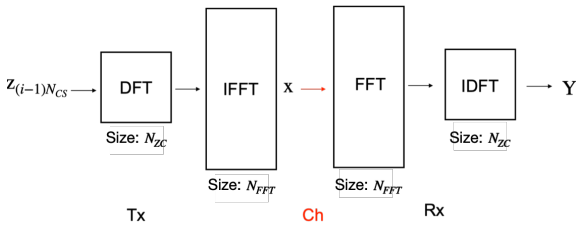

그림 2. 직교 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 시스템 전송 절차

$\mathbf{x}(\in\mathbb{C}^{N_{FFT}+N_{CP}})$를 기지국으로 신호를 전송한다. LoS와 L개의 다중 경로를 포함하는 무선 채널을 통과하고 부가 잡음이 더해진 시간 영역 수신 신호는 CP를 제거한 후 그림 2와 같이 기지국에서 FFT와 IDFT 과정을 수행한다. 본 논문에서는 다중안테나 기지국을 고려함에 따라, 모든 안테나에서 최종적으로 수신되는 신호 $\mathbf{Y}\in\mathbb{C}^{J\times N_{ZC}}$의 $j(\in\{1,\cdots,J\})$째 안테나에서 $n(\in\{0,\cdots,N_{ZC-1}\})$째 시간 샘플 $y_j(n)$은 다음과 같다.

$$y_j(n)=\sqrt{R^{-\alpha}}z_{(i-1)N_{CS}}(n-\tau_{D,j})a_j(\theta) \quad ,$$
$$+\sum_{l=1}^{L}\sqrt{R_l^{-\alpha}}z_{(i-1)N_{CS}}(n-\tau_{D,j}-\tau_{l,j})h_{l,j}(n)+w_j(n)$$

여기서 $\tau_{D,j}$는 단말과 기지국의 j째 안테나까지의 전파 지연을 나타내며 $\tau_{l,j}$은 $l(\in\{1,\cdots,L\})$째 다중 경로에 대한 지연을 나타내고 R_l은 l째 다중 경로 거리를 나타낸다. 또한 α는 경로 감쇄 지수를 나타낸다. $a_j(\theta)$는 가시선 경로로 입사되는 신호 방향에 따라 결정되는 j째 안테나에 대한 위상 정보를 의미하며 균일 선형 배열안테나(uniform linear array: ULA)를 가정할 때 $a_j(\theta)$는 다음과 같다.

$$a_j(\theta)=e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(j-1)d\cos\theta},$$

여기서 λ과 d는 각 파장과 안테나 이격거리를 나타낸다. 다중 경로 채널 $h_{l,j}$는 통계적으로 평균이 0이고 분산이 σ_l^2인 복소 가우시안 분포를 따르며, w_j는 j째 안테나에서 발생하는 부가 열잡음을 의미하며 통계적으로 평균이 0이고 분산이 σ^2인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다.

기지국은 N_{ZC}개의 ZC 시퀀스를 수신 신호에 역확산(despreading) 함으로써 단말이 전송한 시퀀스 인덱스, LoS 경로 신호 성분 및 LoS 경로에 대응되는 전파 지연을 추정한다. 본 논문에서는 시퀀스 인덱스 추정은 첫 번째 안테나에 대해서만 진행한다고 가정하였고 모든 시간 지연은 샘플링 주기의 정수배라고 가정하였다. 따라서, 역확산을 통해 추정한 전파 지연 $\hat{\tau}_{D,1}$에 대해 다음과 같은 조건을 만족할 때 지연된 시퀀스 신호를 $\mathbf{z}_{(i-1)N_{CS}}$로 복조할 수 있다.

$$((i-1)N_{CS}+\hat{\tau}_{D,1})\bmod N_{ZC}\le iN_{CS},$$

여기서 mod는 modulo 연산을 나타낸다. 단말의 위치 측위는 전파 지연을 이용한 거리 추정과 방향탐지를 이용한 도래각 추정을 통해 수행될 수 있다. 거리 추정의 경우 각 안테나에 대한 전파 지연 추정 $\hat{\tau}_{D,j}$를 통해 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{R}=\frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}c\hat{\tau}_{D,j},$$

여기서 c는 빛의 속도를 의미한다. 다중안테나를 활용한 도래각 추정은 ZC 시퀀스를 역확산함으로써 가시선 경로에 대한 신호를 추출한 $\tilde{\mathbf{y}}(\in\mathbb{C}^J)$ 신호에 대해 수행할 수 있으며 j째 신호는 다음과 같다.

$$\tilde{y}_j=\beta_j\sqrt{R^{-\alpha}}a_j(\theta)+\tilde{w}_j,$$

여기서 $\beta_j\in[0,N_{ZC}]$는 전파 지연 추정 오차에 대한 역확산 이득을 의미하며, 정확하게 전파 지연을 추정하여 역확산을 수행할 때 N_{ZC} 이득을 얻을 수 있다. 전체 패킷에 대해 가시선 경로에 대한 신호를 수집한 후 [5]와 같이 다중안테나 기반 방향탐지를 수행하여 최종적으로 기지국은 다음과 같이 단말의 2차원 위치를 추정할 수 있다.

$$(\hat{x},\hat{y})=(\hat{R}\cos\hat{\theta},\hat{R}\sin\hat{\theta}),$$

여기서 $\hat{\theta}$은 방향탐지를 통해 추정한 도래각을 의미한다.

Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

표 1. 모의실험 환경.

Parameter	Value	Parameter	Value
중심 주파수(f_c)	1.8 GHz	단말의 도래각(θ)	20°
시퀀스 길이(N_{ZC})	839	단말과 기지국간 거리(R)	18 m
이동 계수(N_{CP})	13	기지국 안테나 수 (J)	4
FFT 크기(N_{FFT})	2048	다중 경로 수 (L)	1
부반송파 간격	15 kHz	샘플 시간 (T_s)	32.6 ns
시스템 대역폭	30.72 MHz	전파 지연 시간 (τ_D)	$4T_s$
CP 크기(N_{CP})	256	다중 경로 지연 시간 (τ_L)	$2T_s$
경로 감쇄 지수(α)	2	다중 경로 신호 분산 (σ_l^2)	0.8

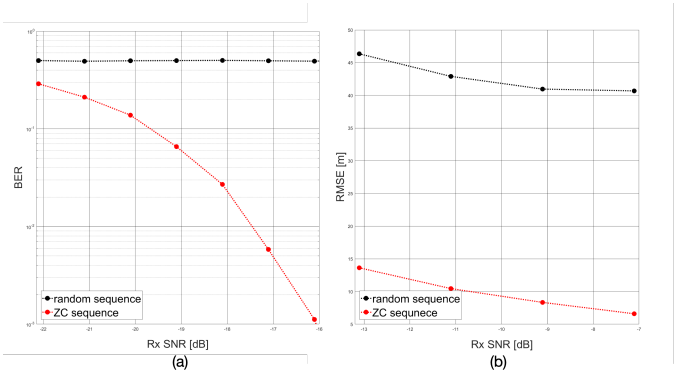

그림 3. 시퀀스 인덱스의 BER(a), 단말 위치의 RMSE(b)

그림 3은 제안하는 OFDM 기반 ISAC 시스템의 수신 신호 대 잡음비(signal-to-noise: SNR) 대비 통신 및 측위 성능을 도시한 결과이다. 본 논문에서는 제안하는 시스템을 검증하기 위해 표 1과 같은 모의실험 환경을 구성하였다. 구체적으로, 길이 839개를 갖는 ZC 시퀀스에 이동 계수를 13으로 설정함으로써 단말은 전체 패킷에 대해 6 비트씩 분할하여 64개의 후보 ZC 시퀀스 인덱스에 대응시킨다. CP를 제외한 OFDM 심볼 시간은 대략 66.7μs로 고정하였으며 오버샘플링은 고려하지 않았다. 또한, 기지국에서의 도래각 추정은 다중 신호 분류(multiple signal classification: MUSIC) 알고리즘을 수행하였다 [5]. 최종적으로, 그림 3을 통해 ZC 시퀀스를 이용한 통합 탐지 및 통신 시스템이 $\mathcal{CN}(0,1)$을 따르는 랜덤한 시퀀스를 이용한 시스템 성능과 비교하였을 때 우수한 통신 및 측위 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No.NRF-2022R1I1A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] Z. Wei, *et. al.*, "Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: A survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11068-11092, Jul. 2023.

[2] A. Liu, *et. al.*, "A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication," *IEEE Commun. Surveys Tut.*, vol. 24, no. 2, pp. 994-1034, 2nd Quart. 2022.

[2] C. Zhang, W. Yi, Y. Liu, and L. Hanzo, "Semi integrated sensing and communication(semi-ISAC): From OMA to NOMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 4, pp. 1878-1893, Apr. 2023.

[4] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced.* Honoken, NJ, USA: Wiley, 2011.

[5] 이영석, 이인기, 정방철, "PS-LTE 네트워크에서 신호원 방향탐지 알고리즘의 성능 분석," 한국통신학회 논문지, vol. 48, no. 5, pp. 539-542, May 2023.