

5G NR 프리앰블을 활용한 OFDM 기반 통합 탐지 및 통신 시스템

이하은, 이영석, 이인기[†], 정방철
 충남대학교, [†]한국전자통신연구원

haeunlee@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, popularity1@etri.re.kr, bcjung@cnu.ac.kr

OFDM-Based Integrated Sensing and Communication System with 5G NR Preambles

Ha-Eun Lee, Young-Seok Lee, InKi Lee[†], Bang Chul Jung

Chungnam National University, [†]Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문에서는 5세대 이동통신(fifth-generation mobile communication: 5G) 시스템에서 활용하고 있는 프리앰블(preamble)을 활용하여 기지국이 단말의 위치 정보와 통신 데이터를 동시에 추정할 수 있는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 통합 무선 측위 및 통신 시스템을 제안한다. 제안하는 기술은 5G NR(new radio) 시스템에서 활용되고 있는 시퀀스(sequence) 프리앰블의 우수한 자기 상관(auto-correlation) 특성을 이용하여 시퀀스 인덱스 변조를 추가 도입해 통신과 무선 측위 서비스를 기존 5G 상용 시스템의 하드웨어/소프트웨어를 통해 동시에 지원할 수 있다. 모의실험을 통해 5G NR 시스템에서 활용되고 있는 다양한 시퀀스에 대한 제안하는 기법의 통신 및 무선 측위 성능을 평가하고 향후 6G 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템에서 제안하는 기술의 활용 가능성을 제시한다.

I. 서론

최근 국제 전기통신 연합(international telecommunication union: ITU)은 고비용 하드웨어와 주파수 자원 고갈 등의 문제를 해결하기 위해 동일한 주파수 및 하드웨어를 공유하여 센싱과 통신 서비스를 동시에 제공하는 통합 센싱-통신(integrated sensing and communication: ISAC) 서비스를 6세대 이동통신(sixth-generation mobile communication: 6G) 시스템의 주요 비전으로 제시하였다. 그러나, 서로 목적이 상이한 이종(heterogeneous) 서비스를 지원하는 융합 플랫폼은 하드웨어 공유 시 발생할 수 있는 복잡도 및 성능 열화나 시스템 요구사항 수정 및 기존 인프라 호환성 문제 등 개선해야 할 문제점이 다수 존재한다 [1]. 따라서, 통신 시스템과 측위와 같은 고차원 레이다 기능을 동시에 수행할 수 있는 효과적인 ISAC 시스템 운용을 위해선 현재 상용망 하드웨어 및 프로토콜과 호환 가능한 ISAC 시스템 연구가 필요할 수 있다.

한편, 현재 상용화된 5G 시스템에선 임의 접속(random access), 상/하향 링크 무선 채널 추정, 시간 동기화 등의 제어 신호를 위해 우수한 자기 상관성(auto-correlation)을 갖는 시퀀스(sequence) 신호 또는 프리앰블(preamble)을 활용하고 있다 [2]. 이러한 시퀀스 신호는 자기 상관 특성을 활용하여 레이다 센싱 기능을 위한 전파 지연 정보를 추정하는데 활용될 수 있다. 이로 인해, [3]에서는 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 시스템에서 Zadoff-Chu 시퀀스를 활용한 새로운 ISAC 시스템을 제안하고, 이상적인 통신 환경을 고려한 기초적 연구 결과를 보고하였다.

본 논문에서는 [3]에서 제안한 시퀀스 기반 OFDM-ISAC 기술 연구를 확장하여, 5G NR(new radio) 상용망 시스템과 호환 가능한 5G NR 프리앰블 기반 통합 무선 측위 및 통신 시스템을 제시한다. 구체적으로, 본 논문에서는 상향링크 SRS(sounding reference signal) 신호 및 PSS(primary synchronization sequence) 등 5G NR 시스템에서 활용하고 있는 대표적인 시퀀스 신호를 고려하여 인덱스 변조를 도입한 통신 프로토콜을 소개한다. 이후, 시퀀스 신호의 자기 상관성 및 단일 샘플에 대해서도 우수한 방향탐지 성능을 달성할 수 있는 압축 센싱(compressed sensing) 기반 직교 매칭 퍼스uits(orthogonal matching pursuit: OMP) 기술 [4]을 도입한 저복잡도 무선 측위 방식을 결합한 OFDM-ISAC 시스템을 제시하고, 모의실험을 통해 5G NR 시퀀스 신호 간 통신 및 무선 측위 성능을 평가한다.

II. 5G NR 프리앰블 기반 OFDM-ISAC 시스템 모델

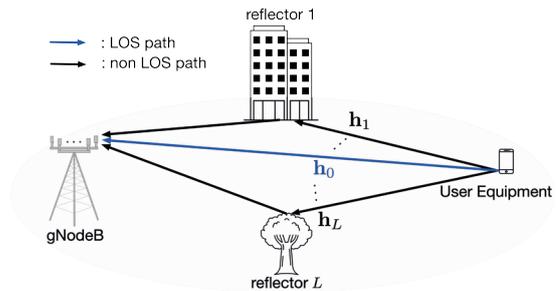


그림 1. 5G NR 프리앰블 기반 OFDM-ISAC 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 안테나를 갖는 UE(user equipment)와 P 개의 다중안테나를 갖는 5G NR 기지국(next-generation node B: gNB)을 고려한다. 이때, gNB와 UE 사이에는 가시선(line-of-sight: LoS) 경로와 L 개의 다중 경로가 존재하며, gNB는 $x-y$ 평면상 $(0,0)$ 에 위치하고 UE는 $(x,y) = (d_0 \cos\theta, d_0 \sin\theta)$ 좌표에 존재한다고 가정하였다. 여기서 d_0 는 gNB와 UE 간 LoS 거리를 나타내고 θ 는 기지국 기준 UE 위치에 대한 방향을 나타낸다. 셀 반경 내 UE는 임의 접속 프리앰블과 같은 시퀀스 신호를 gNB로 전달할 때 인덱스 변조를 추가로 도입하여 통신 데이터를 함께 전송한다고 가정한다. 구체적으로, 길이 N_s 를 갖는 시퀀스 신호는 전파 지연 및 지연 확산(delay spread) 등을 고려하여 길이 N_{CS} 이격을 두어 $M = \lfloor N_s / N_{CS} \rfloor$ 개의 송신 후보 프리앰블을 생성할 수 있다. 즉, gNB와 UE는 다음과 같이 송신 후보 프리앰블 집합을 공유하고, 전송하고자 하는 비트 정보를 프리앰블 후보 인덱스에 매핑함으로써 gNB-UE 간 추가적인 통신을 지원할 수 있다.

$$S = \{\mathbf{s}_0, \mathbf{s}_{N_{CS}}, \dots, \mathbf{s}_{(M-1)N_{CS}}\}.$$

본 논문에서는, 설명의 용이성을 위해 UE가 $i(i \in \{1, \dots, M\})$ 번째 후보 시퀀스 $\mathbf{s}_{(i-1)N_{CS}}$ 를 gNB로 전송할 때의 OFDM-ISAC 시스템을 서술한다.

먼저, 시간 영역에서 정의된 시퀀스 신호는 OFDM 부반송파(sub-carrier) 매핑을 위해 크기가 N_s 인 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform: DFT)를 수행하고 $k(k \in \{1, \dots, N_s\})$ 번째 부반송파에 다음과 같은 주파수 영역 시퀀스 신호를 매핑한다.

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N_s-1} s_{(i-1)N_{CS}}(n) e^{-j\frac{2\pi k}{N_s}n}$$

OFDM을 고려하여 크기가 $N_{FFT} (> N_s)$ 인 역 고속 푸리에 변환(inverse fast FT: IFFT) 연산을 위해 $N_{FFT} - N_s$ 개의 부반송파에는 zero-padding 하여 다음과 같이 시간 영역 시퀀스 신호를 생성하고 N_{CP} 길이를 갖는 cyclic prefix (CP)를 삽입한다.

$$x(m) = \frac{1}{N_{FFT}} \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} S(k) e^{j\frac{2\pi k}{N_{FFT}}m}, x_{CP}(c) = x((c - N_{CP}) \bmod N_{FFT})$$

여기서, $x(m)$ 은 $m \in \{0, \dots, N_{FFT} - 1\}$ 짝 시간 영역 송신 신호를 나타내고 $x_{CP}(c)$ 는 CP를 삽입한 이후 $c \in \{0, \dots, N_{FFT} + N_{CP} - 1\}$ 짝 시간 영역 송신 신호를 나타낸다.

본 논문에서는 gNB와 UE 간 시간 동기화가 맞춰져 있다고 가정하였다 [5]. 따라서, gNB에서 CP를 제거한 후, UE로부터 gNB $p \in \{1, \dots, P\}$ 짝 안테나까지 LoS 전파 경로에 대한 전파 지연 τ_p 과 L 개의 다중 경로를 고려한 $t \in \{0, \dots, N_{FFT} - 1\}$ 짝 시간 수신 신호 $x_{h,p}(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{h,p}(t) = \sum_{l=0}^L \sqrt{d_l}^\alpha h_p(l) x[(t-l-\tau_p) \bmod N_{FFT}] + w_p(t),$$

여기서, d_l 과 α 는 각각 $l \in \{0, \dots, L\}$ 짝 전파 경로 거리와 경로 감쇄 지수를 나타내고 mod는 modulo 연산을 의미하며 $w_p(t)$ 는 시간 영역 부가 잡음을 나타낸다. 본 논문에서는 균일 선형 배열안테나(uniform linear array: ULA)를 가정하여 UE와 gNB의 p 짝 안테나 간 LoS 경로에 해당하는 무선 채널 $h_p(0)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$h_p(0) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(p-1)r \cos\theta}$$

여기서 λ 와 r 은 각각 파장과 안테나 이격거리를 나타낸다. gNB의 p 짝 안테나에서 수신한 신호 $x_{h,p}(t)$ 에 대해 FFT를 수행하면, N_{FFT} 개의 주파수 영역 수신 신호를 얻을 수 있고 그 중 $w \in \{0, \dots, N_s - 1\}$ 짝 부반송파에 해당하는 주파수 영역 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{H,p}(w) = H_p(w)X(w)e^{-j\frac{2\pi w}{N_{FFT}}\tau_p} + W_p(w)$$

여기서 $H_p(w)$ 는 무선 채널의 주파수 응답을 나타내고 $W_p(w)$ 는 주파수 영역 부가 잡음을 나타낸다. 본 논문에서 주파수 영역 잡음은 통계적으로 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정하였다. 최종적으로, UE가 전송한 시퀀스 신호를 검파하기 위해 크기가 N_s 인 IDFT를 수행하여 다음과 같은 시간 영역 수신 신호 $y_p(n)$ 을 획득한다.

$$y_p(n) \approx \sum_{l=0}^L \sqrt{d_l}^\alpha \tilde{h}_p(l) s_{(i-1)N_{CS}}\left(n-l - \left\lfloor \frac{N_s}{N_{FFT}}\tau_p \right\rfloor\right) + \tilde{w}_p(n),$$

여기서 $\tilde{h}_p(n)$, $\tilde{w}_p(n)$ 는 각각 $n \in \{0, \dots, N_s - 1\}$ 짝 H_p , W_p 의 N_s 크기 IDFT 결과를 나타낸다.

이후, gNB는 p 짝 안테나로 수신받은 신호 $y_p(n)$ 에 대해 모든 시퀀스 $[\mathbf{s}_0, \mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_{N_s-1}]$ 를 역확산(despreading)하고 상관값이 특정 임계치 이상인 시퀀스 중 최소 인덱스 $T_p \in \mathbb{N}$ 에 해당하는 신호를 LoS 전파 경로에 해당하는 신호로 추정한다. 따라서, gNB는 추정한 인덱스 정보를 이용하여 다음과 같이 송신 시퀀스 및 이에 대응되는 비트를 검파할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{s}_{a_1 N_{CS}}, a_1 = \lfloor T_1 / N_{CS} \rfloor.$$

또한, p 짝 안테나에 대해 전파 지연을 $\hat{\tau}_p = T_p - a_p$ 와 같이 추정하여 단말과 기지국 간 거리 \hat{d}_0 를 추정하고 [4]와 같이 압축 센싱 기반 OMP 알고리즘을 통한 도래각 추정을 진행하여 gNB는 다음과 같이 UE의 2차원 위치를 추정할 수 있다.

$$(\hat{x}, \hat{y}) = (\hat{d}_0 \cos \hat{\theta}, \hat{d}_0 \sin \hat{\theta}),$$

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

III. 모의실험 결과 및 결론

표 1. 모의실험 환경.

Parameter	Value	Parameter	Value
UE와 gNB 간 거리(d_0)	22 m	단말의 도래각(θ)	45 °
FFT 크기(N_{FFT})	2048	CP 크기(N_{CP})	256
부반송파 간격	15 kHz	중심 주파수(f_c)	1.8 GHz
시스템 대역폭	30.72 MHz	다중 경로 수 (L)	5
기지국 안테나 수 (P)	4	경로 감쇄 지수(α)	2
샘플 시간 (T_s)	32.6 ns	전파 지연 시간 (τ)	$3T_s$

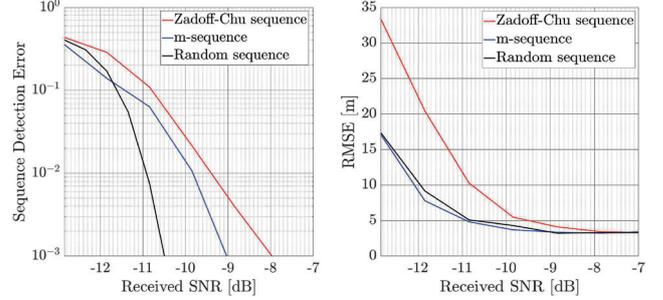


그림 2. OFDM-ISAC 시스템의 통신 및 측위 성능

본 논문에서는 5G NR에서 SRS로 활용하는 Zadoff-Chu (ZC) 시퀀스와 PSS로 활용하는 m-시퀀스, 그리고 성능 비교를 위한 임의의 시퀀스를 이용하여 제안하는 프리앰블 기반 OFDM-ISAC 기법의 성능을 평가한다. 이때, ZC 시퀀스는 $N_s = 839$, $N_{CS} = 13$, m-시퀀스와 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 분포를 따르는 임의의 시퀀스는 $N_s = 1023$, $N_{CS} = 15$ 로 설정함으로써 6비트 전송을 위한 송신 후보 프리앰블을 구성하였고, 공정한 성능 비교를 위해 송신 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR)를 동일하게 설정하였다. 또한, 구체적인 OFDM-ISAC 시스템 모의실험을 위한 파라미터는 표 1과 같다. 그림 2는 제안하는 OFDM-ISAC 시스템의 수신 SNR 대비 통신 및 측위 성능을 각각 시퀀스 탐지 오율(sequence detection error) 및 UE 위치 추정에 대한 제공된 평균 제곱 오차(root mean squared error: RMSE) 관점에서 도시한 결과이다. 모의 실험을 통해 제안하는 프리앰블 기반 OFDM-ISAC 시스템이 실제적인 수신 SNR 영역에서 우수한 통신 및 무선 측위 성능을 갖는 것을 검증하였으며, 실질적인 통신 환경을 고려할 때 m-시퀀스를 활용한 OFDM-ISAC이 가장 우수한 성능을 갖는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 실제 상용망에서 활용하고 있는 시퀀스를 이용한 ISAC 시스템을 제안하였으며, 제안하는 기법은 기존 통신 인프라에서 별도의 하드웨어/소프트웨어 수정이 필요하지 않아 실용적인 ISAC 기술로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740) 및 행정안전부 지능형 상황관리 기술개발 사업의 지원(2022-MOIS37-005)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Y. Zhong, et al., "Empowering the V2X network by integrated sensing and communications: Background, design, advances, and opportunities," *IEEE Netw.*, vol. 36, no. 4, pp. 54-60, Oct. 2022.
- [2] 3GPP, "TS 38.211; NR Physical channels and modulation," 2020.
- [3] 이하은, 이영석, 정방철, "Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 OFDM기반 통합 탐지 및 통신 시스템," *한국통신학회 동계종합학술발표회*, pp. 1219-1220, Feb. 2024.
- [4] 이영석, 이인기, 정방철, "PS-LTE 네트워크에서 신호원 방향탐지 알고리즘의 성능 분석," *한국통신학회 논문지*, vol. 48, no. 5, pp. 539-542, May 2023.
- [5] M. Hua, M. Wang, K. W. Yang, and K. J. Zou, "Analysis of the frequency offset effect on Zadoff-Chu sequence timing performance," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 11, pp. 4024-4039, Nov. 2014.