

아이작 환경에서의 자도프-추 시퀀스와 FMCW 신호의 유사도 해석 기반 랜덤 액세스 성능 분석

박종명, 김채은, 함태규, 김동환*, 이웅희

동국대학교, *고려대학교 세종

whdaud0905@dgu.ac.kr, che12@dgu.ac.kr, tkdragon0204@naver.com, *dong0954@korea.ac.kr,
woongheelee@dongguk.edu

On the Performance of Random Access in ISAC Systems: A Perspective on the Similarity between Zadoff-Chu Sequence and FMCW Signal

Jong-Myeong Park, Chae-Eun Kim, Tae-Gyu Ham, *Dong-Hwan Kim, Woong-Hee Lee
Donnguk Univ., *Korea Univ, Sejong.

요약

본 연구는 차세대 통신 시스템인 ISAC 환경에서 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 간섭 문제를 해결하기 위한 연구입니다. Zadoff-Chu 시퀀스의 루트 인덱스에 따라 FMCW 신호와의 유사도가 달라진다는 것을 확인하였으며, 특정 루트 인덱스는 두 신호 간 간섭을 야기하여 통신 성능 저하를 초래할 수 있다는 사실을 밝혔습니다. 따라서 본 연구 결과는 ISAC 시스템 설계 시, 루트 인덱스를 신중하게 선택하여 통신 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 지침을 제공한다.

I. 서론

차세대 통신 기술인 5G와 향후 6G 네트워크는 통신 기능과 센싱 기능을 통합하려는 Integrated Sensing and Communication(ISAC) 개념을 중심으로 발전하고 있다. ISAC 시스템은 통신과 센싱을 동일한 무선 자원에서 수행함으로써 자원의 효율성을 극대화할 수 있는 가능성을 제시하지만, 통신 신호와 센싱 신호 간의 상호작용에서 발생하는 간섭 문제는 주요 도전 과제로 부각되고 있다.

5G 랜덤 액세스(Random Access) 과정에서 Zadoff-Chu(ZC) 시퀀스는 Physical Random Access Channel(PRACH) 신호로 사용되며, 뛰어난 자기 상관 특성과 낮은 크로스코릴레이션 특성을 통해 다중 사용자 환경에서 안정적인 초기 접속(Initial Access)을 지원한다. Zadoff-Chu(ZC) 시퀀스는 기지국과 단말 간의 시간 및 주파수 동기화를 가능하게 하여 통신 네트워크의 신뢰성을 높이는 데 핵심적인 역할을 한다 [1]. 반면, 센싱 분야에서는 Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) 신호가 널리 사용되며, 차량용 레이더 등 다양한 분야에서 목표의 거리와 속도를 정밀하게 측정한다 [2].

특히, Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호는 특정 조건에서 높은 유사성을 가질 수 있다. 이러한 유사성은 ISAC 환경에서 두 신호 간의 간섭을 발생시키며, 이는 랜덤 액세스 과정에서 통신 성능 저하를 초래할 가능성이 있다. 예를 들어, Zadoff-Chu(ZC) 시퀀스와 FMCW 신호 간의 Cosine Similarity(SC)가 높아질 경우, PRACH 신호의 검출 성능이 저하되거나, 센싱 신호가 통신 신호로 오인하여 문제가 발생할 수 있다 [3].

본 연구는 ISAC 환경에서 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호, 그리고 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) 신호와 FMCW 신호 간의 Cosine Similarity(CS)를 평가한다.

II. 본론

A. Cosine Similarity(CS)

Cosine Similarity(CS)는 두 벡터 간의 방향적인 유사성을 측정하는 방법이다. 이는 두 벡터 간의 내적(dot product)을 각 벡터의 크기(norm)의 곱으로 나누어 계산되며 두 벡터 \mathbf{a} 와 \mathbf{b} 의 Cosine Similarity(CS)는 다음과 같이 정의된다.

$$CS(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{|\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}|}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\|}. \quad (1)$$

B. Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호의 Cosine Similarity(CS)

Zadoff-Chu 시퀀스는 주어진 루트 인덱스와 길이에 따라 생성된다. 해당 시퀀스는 주로 주기적인 특성을 가지며, 이 시퀀스의 시간 도메인 표현은 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통해 얻어진다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{z}[n] = \exp(-j \frac{\pi r n(n+1)}{N_{zc}}), \quad n = 0, 1, \dots, N_{zc} - 1. \quad (2)$$

Zero-padding 후 IFFT : $\mathbf{z}_{time} = IFFT(\mathbf{z}[n])$.

Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW) 신호는 주파수 변화가 선형적인 특성을 가지며, 이는 시간 도메인에서 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{s}_{FMCW}(t) = \exp(j2\pi(\frac{k}{2}t^2)). \quad (3)$$

따라서, Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 Cosine Similarity(CS)는 다음과 같이 계산된다.

$$CS(\mathbf{z}, \mathbf{s}) = \frac{|\sum_{k=1}^N \mathbf{z}[k] \mathbf{s}^*[k]|}{\sqrt{\sum_{k=1}^N |\mathbf{z}[k]|^2 \sum_{k=1}^N |\mathbf{s}[k]|^2}} \quad (4)$$

다음으로는 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 구조적 유사성을 평가하기 위한 시뮬레이션에 대한 설명이다. Zadoff-Chu 시퀀스는 $N_{zc} = 63$ 과 루트 인덱스 $r = [8, 23, 53]$ 을 사용하여 생성되었으며, FMCW 신호는 100 MHz 대역폭과 1 GHz 샘플링 주파수를 기반으로 생성되었다. 비교를 위해 OFDM 신호는 4-QAM, 256-QAM, 1024-QAM 변조 방식을 사용하여 설계되었다. 실험은 SNR이 -5dB 부터 25dB까지인 다양한 조건에서 수행되었으며, 각 조건에 대해 1000번 반복하여 평균 유사도를 계산하였다. 이러한 설정은 다양한 SNR 환경에서 신호 간 유사성을 분석하고, 통신 및 센싱 신호 간 간섭 가능성을 평가하기 위한 것이다.

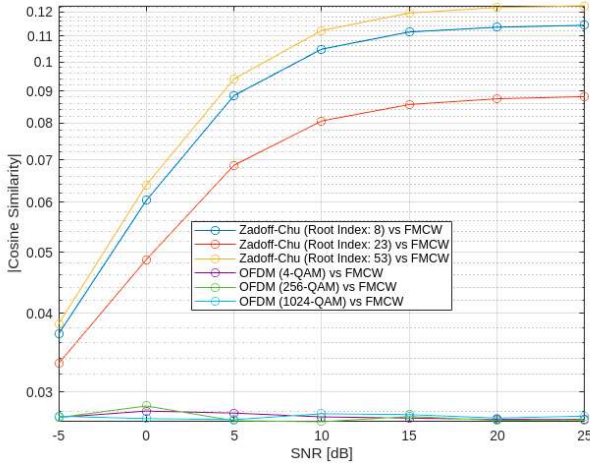


그림1. SNR에 따른 Zadoff-Chu 시퀀스 (Root Index: 8, 23, 53)와 FMCW 신호 간의 Cosine Similarity(CS).

그림1은 $N_{zc} = 63$ 에서 서로 다른 루트 인덱스($r = 8, 23, 53$)를 가진 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 코사인 유사도를 SNR에 따라 비교한 결과를 보여준다. 루트 인덱스가 증가할수록 유사도가 높아지는 경향을 보였으며, 특히 $r = 53$ 에서 가장 높은 유사도를 기록하였다. SNR이 증가함에 따라 모든 루트 인덱스에서 유사도가 상승하였으며, 이는 잡음의 영향이 감소했기 때문이다. 반면, OFDM 신호는 모든 변조 차수에서 FMCW 신호와의 유사도가 매우 낮아 구조적 차이가 크다는 점을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 루트 인덱스 선택이 ZC 시퀀스와 FMCW 신호 간 간섭 가능성에 중요한 영향을 미친다는 것을 시사한다.

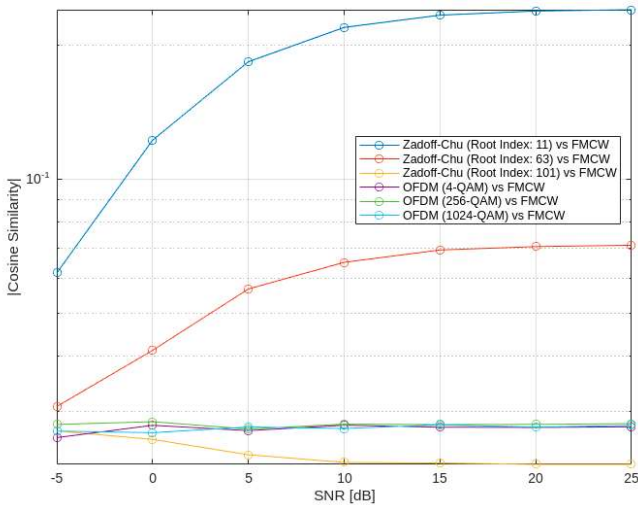


그림 2. SNR에 따른 Zadoff-Chu 시퀀스 (Root Index: 11, 63, 101)와 FMCW 신호 간의 코사인 유사도.

그림2는 $N_{zc} = 127$ 에서 루트 인덱스 $r = [11, 63, 101]$ 을 사용한 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 Cosine Similarity를 SNR 조건에 따라 비교한 결과를 나타낸다. 루트 인덱스 $r=11$ 은 높은 유사도를 보이며, SNR이 증가할수록 FMCW 신호와 구조적으로 매우 유사한 특성을 보였다. 반면, $r = 63$ 은 중간 수준의 유사도를 보였고, $r = 101$ 에서는 유사도가 크게 감소하였다.

이러한 현상은 루트 인덱스가 N_{zc} 와의 상호 관계(주파수 도메인 분포의 특성)에 기인한다. Zadoff-Chu 시퀀스의 주파수 성분은 루트 인덱스 r 에 의해 분포가 결정되며, 특정 r 값에서 FMCW 신호의 선형 주파수 변조 특성과 맞지 않는 주파수 스펙트럼을 가지게 된다. 특히, $r = 101$ 의 경우 비선형적 위상 변화가 발생한다. 이러한 비선형성은 시간 도메인에서 FMCW 신호와의 상관성을 크게 감소시키며, 유사도를 낮추는 원인으로 작용한다.

결과적으로, 루트 인덱스 선택은 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 간섭 가능성을 제어하는 데 중요한 역할을 하며, r 값의 수학적 특성과 신호의 주파수 특성을 동시에 고려해야 한다.

III. 결론

본 연구는 Zadoff-Chu 시퀀스와 FMCW 신호 간의 유사성을 SNR 조건에 따라 분석하였으며, 루트 인덱스의 선택이 신호 간 간섭 가능성에 미치는 영향을 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 특정 루트 인덱스(예: $r = 11$)에서 FMCW 신호와 높은 유사도를 보였고, 이는 ISAC 환경에서 간섭 가능성을 높이는 요인으로 작용할 수 있음을 확인하였다. 반면, $r = 101$ 과 같은 루트 인덱스는 낮은 유사도를 보여 간섭 가능성이 적은 특성을 보였다. 이러한 결과는 루트 인덱스 설계가 통신과 센싱 신호 간의 간섭 완화에 중요한 설계 요소임을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00217885, 주파수 이용효율 향상을 위한 통합형 간섭분석 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] S. Seol, Y. Kim, M. Kim, and J. Chung, "Zadoff - Chu sequence pilot for time and frequency synchronization in UWA OFDM system," *Electronics*, vol. 13, no. 18, p. 3679, 2024.
- [2] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, "Automotive radars: A review of signal processing techniques," *IEEE signal processing magazine*, vol. 34, no. 2, pp. 22 - 35, 2017.
- [3] M. Hyder and K. Mahata, "Zadoff - Chu sequence design for random access initial uplink synchronization in LTE-like systems," *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 16, no. 1, pp. 503 - 511, 2016.