

Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 OFDM 기반 드론 신호의 시간 동기화 성능 분석

정재연, 남해운
한양대학교

jy1019@hanyang.ac.kr, hnam@hanyang.ac.kr

Performance Analysis of Time Synchronization for OFDM-based Drone Signals Using Zadoff-Chu Sequence

Jaeyeon Jung, Haewoon Nam
Hanyang Univ.

요약

본 논문은 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 기반의 RC 신호에 Zadoff-Chu (ZC) 시퀀스를 활용하여 시간 동기화를 수행하는 방법을 제안한다. 시뮬레이션 결과, Cyclic prefix (CP) 교차상관을 통한 시간 동기화 방법에 비해 높은 정확도를 보였다. 제안한 방법을 통해 드론의 시간-주파수 동기화에서 발생하는 비효율적인 에너지 소비 문제를 해결함으로써, 장비 및 공장 관리에 사용되는 드론의 전원 사용 효율을 높이고 보다 효과적인 관리에 기여할 수 있을 것이다.

I. 서론

오늘날 기업의 장비 및 공장 관리에 드론을 활용하는 사례가 증가하고 있으며, 이로 인해 드론의 전원 사용 효율성을 높여 가동 시간을 연장하고 보다 효과적으로 장비 및 공장을 관리할 필요성이 점차 강조되고 있다. 2003년부터 2024년까지 구미산단 기업을 대상으로 실시한 에너지 사용 현황 조사에서도 기업의 에너지 효율화 수요가 높다는 사실을 확인할 수 있었다. RC 신호는 짧은 time duration 을 가지고 신속하게 주파수를 호핑하기 때문에, 드론은 RC 신호 탐지 및 시간-주파수 동기화에서 어려움을 겪으며, 이로 인해 비효율적인 에너지 소모가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 드론의 전원 사용 효율화를 위한 기술로 ZC 시퀀스 교차상관을 활용한 드론 RC 신호의 시간 동기화 방법을 제안한다.

II. 시간 동기화 알고리즘

OFDM 기반 신호의 시간 동기화 방식에는 CP 특성을 활용한 교차상관 방법이 있다. 그러나 DJI 의 RC 신호는 다운링크 신호에 비해 CP 샘플 수가 현저히 적어, 신호 대 잡음 비율 (Signal-to-noise ratio, SNR)이 낮은 환경에서는 CP 특성을 활용한 교차상관 방법이 효과적이지 않다. 따라서 본 논문에서는 ZC 심볼을 포함하는 RC 신호의 시간 동기화를 위해, 자기 상관 특성이 우수한 ZC 시퀀스와 RC 신호 간의 교차상관 방법을 적용하는 방법을 제안한다. [그림 1]의 두 피크를 통해 ZC 시퀀스를 활용한 ZC 심볼 검출 능력을 확인할 수 있다.

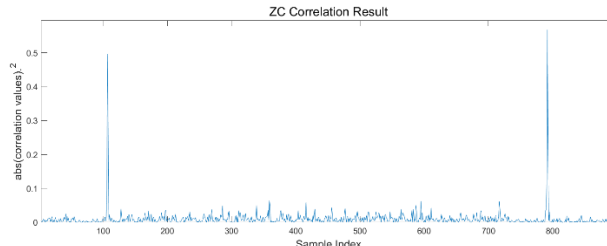


그림 1. RC 신호와 ZC 시퀀스의 교차상관 결과 (SNR 0dB)

ZC 시퀀스 교차상관을 수행하기 위해서는 ZC 시퀀스 생성 과정이 우선 되어야 하며, ZC 시퀀스의 수식은 식 (1)과 같다[1].

$$S_q[n] = \exp \left[-j\pi q \frac{n(n+1)}{N_{zc}} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 N_{zc} 은 서브캐리어 개수이고 q 는 루트 인덱스를 의미한다. DC 를 포함하여 73 개의 Occupied 서브캐리어를 가진 타겟 드론 Mavic Pro 의 RC 신호 루트 인덱스를 추정하기 위해, 1 부터 72 까지의 루트 인덱스에 해당하는 ZC 시퀀스를 생성한 후, 주파수 도메인에서 RC 신호와의 교차상관을 수행하여 루트 인덱스가 6 임을 추정하였다. 이에 따라, 루트 인덱스 6 및 FFT 크기 1024 에 해당하는 시간 도메인 ZC 시퀀스를 생성하고, 생성된 ZC 시퀀스와 RC 신호 간의 교차상관을 수행하여 피크를 검출함으로써 RC 버스트의 시작 타이밍을 잡아낸다. Mavic pro 의 RC 버스트는 6 개의 OFDM 심볼로 구성되며, 이 중 첫 번째 심볼이 ZC 심볼이기 때문에 피크 검출을 통해 버스트의 시작 타이밍을 잡을 수 있다.

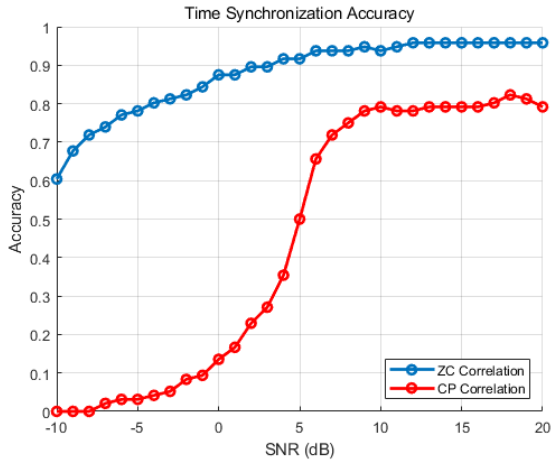


그림 2. SNR 별 ZC 와 CP 교차상관을 통한 시간 동기화 성능 그래프

RC 신호에 ZC 시퀀스를 슬라이딩 하며 교차상관을 수행할 때, 교차상관이 적용되는 RC 신호의 샘플 집합을 윈도우로 지정한다. 윈도우와 ZC 시퀀스의 표준편차를 각각 계산한 후, 교차상관 결과 값을 이 두 표준편차의 곱으로 나누어 정규화 함으로써 두 신호 간의 변동성을 반영한 평가 점수를 산출한다.

III. 시뮬레이션

본 논문에서는 [2]의 오픈소스를 활용하여 USRP B200mini 로 Mavic pro 드론의 RC 신호를 레코딩하고 Center Frequency Offset (CFO)을 보정한 데이터를 사용하였으며, 매트랩을 통해 -10dB 부터 20dB 까지 총 31 가지의 SNR 을 갖는 데이터를 생성하여 시뮬레이션 하였다. ZC 교차상관을 통한 시간 동기화 성능 비교를 위해, CP 교차상관을 이용하여 시간 동기화를 수행한 [3]의 방법을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. FFT 크기 간격만큼 떨어진 RC 신호의 CP 길이로 구성된 두 개의 샘플 집단을 슬라이딩하며 교차 상관을 수행하였으며, 이를 통해 첫 번째 심볼의 CP 에서 피크 검출을 통해 시간 동기화를 진행하였다. 시뮬레이션 성능 지표는 피크 검출을 통해 추정된 버스트의 시작 샘플 인덱스가 정답 샘플 인덱스와 일치하는 비율로 정의하여 Accuracy 를 평가하였으며, 시뮬레이션 결과 그래프는 [그림 2]에 나타나 있다. 시뮬레이션 결과, ZC 교차상관 방법은 2dB 부터 20dB 까지 90% 이상의 정확도를 나타냈으며, -10dB 에서도 60.4%의 정확도를 보였다. 반면, CP 교차상관 방법의 경우 7dB 부터 20dB 까지 평균 78.6% 정확도를 보이며 ZC 교차상관에 비해 낮은 정확도를 나타냈다.

IV. 시뮬레이션 결과 분석

ZC 교차상관 방법의 경우, SNR -10dB 에서 20dB 까지 발생한 에러의 90.8%는 교차상관 결과 값의 작은 차이로 인해 추정된 버스트의 시작 샘플 인덱스와 정답 샘플 인덱스 간의 차이가 1 샘플인 경우를 나타낸다. 이러한 결과를 종합적으로 고려할 때, ZC 교차상관 방법은 저 SNR 환경에서도 매우 높은 시간 동기화 정확도를 유지하는 것으로 평가된다.

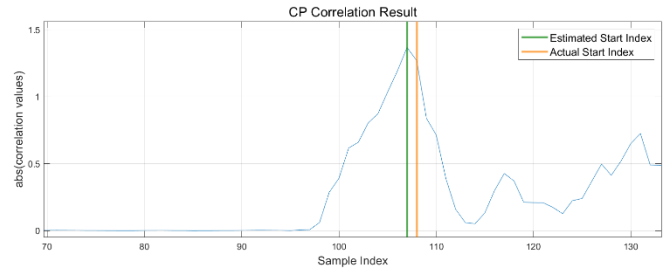


그림 3. RC 버스트 시작 타이밍 추정의 오류가 발생한 인덱스

CP 교차 상관 방법에서 가장 높은 정확도는 82.3%로 나타났으며, 이때의 오류는 ZC 교차 상관 방법과 유사하게 추정된 버스트의 시작 샘플 인덱스와 정답 샘플 인덱스 간의 차이가 1 샘플인 경우에서 발생한다. 이 결과는 [그림 3]을 통해 확인할 수 있다. 또한, SNR 6dB 에 비해 5dB 에서 정확도가 15.6% 감소하는 원인은 피크 검출을 수행하는 파이썬의 signal.find_peaks 라이브러리의 임계치 설정이 최적화되지 않아 추정 인덱스와 정답 인덱스 간의 차이가 1 샘플을 초과하는 경우가 대다수 발생하기 때문이다. 따라서, 추후 시뮬레이션에서는 SNR 별로 임계치를 더욱 세분화하여 설정함으로써 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론

본 논문에서는 ZC 교차상관을 이용한 DJI RC 신호의 시간 동기화 방법을 제안하고, CP 교차상관을 통한 시간 동기화 방법과의 성능을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과, ZC 교차상관을 활용한 시간 동기화 성능이 CP 방법에 비해 현저히 우수함을 확인하였으며, 제안한 방법을 통해 드론의 시간-주파수 동기화에서 발생하는 비효율적인 에너지 소비 문제를 효과적으로 해결할 것으로 예상된다. 또한, 장비 및 공장 관리에 사용되는 드론의 전원 사용 효율화를 통해 가동 시간을 연장하고 보다 효율적인 관리에 기여할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 한국산업단지공단의 경북구미 스마트그린산업단지 에너지자급자족 인프라 구축 및 운영사업에서 제공하는 데이터를 활용하여 수행되었음”

참 고 문 헌

- [1] Andrews, Jeffrey G. "A primer on zadoff chu sequences." arXiv preprint arXiv:2211.05702 (2022).
- [2] Merlin Chlosta, DroneSecurity. Github (<https://github.com/RUB-SysSec/DroneSecurity>), 2023.
- [3] Bender, Conner. "DJI drone IDs are not encrypted." arXiv preprint arXiv:2207.10795 (2022).