

Cyclostationarity 기반 DJI 드론 신호의 샘플링 주파수 추정에 관한 연구

백채희, 이예철, 김정창
국립한국해양대학교

ggamsoon2504@g.kmou.ac.kr, ddc5858@g.kmou.ac.kr, jchkim@kmou.ac.kr

Study on Estimation of Sampling Frequency of DJI Drone Signals Based on Cyclostationarity

ChaeHui Back, YeCheol Lee, Jeongchang Kim
Korea Maritime and Ocean University (KMOU)

요 약

본 논문에서는 Cyclostationarity 를 이용하여, DJI 사의 드론이 사용하는 OcuSync 방식의 OFDM 신호가 갖는 샘플링 주파수를 추정하는 블라인드 방식의 알고리즘을 제안한다. 광대역 수신기의 높은 샘플링 주파수로 오버샘플링된 수신 신호의 자기상관 함수가 갖는 주기성을 분석함으로써 오버샘플링 계수와 송신 신호의 샘플링 주파수를 추정한다.

I. 서 론

최근 드론 산업은 기술 발전과 상업적 수요의 증가로 인해 급속히 성장하고 있다. 항공 촬영, 물류 운송, 농업 자동화, 재난 감시 등 다양한 분야에서 드론의 활용이 확산되면서 시장 규모는 지속적으로 확대되고 있으며, 이에 따라 드론 제조사 간의 기술 경쟁도 치열해지고 있다. 특히 DJI 는 세계 상업용 드론 시장에서 약 70% 이상의 점유율을 차지하고 있다[1].

그러나 드론 보급의 급증과 함께 각종 사건·사고가 빈번히 발생하고 있다. 예를 들어, 드론이 공항 주변에 출현하여 항공편이 지연되거나, 주요 시설 상공을 무단 침입해 보안상 위협이 되는 사례가 지속적으로 보고되고 있다. 특히 DJI 드론은 높은 시장 점유율로 광범위하게 활용되는 만큼, 위협의 가능성 또한 매우 크다. 드론 테러에 대한 위험 평가 연구에 따르면, 국가 중요시설을 대상으로 한 악의적 활용 가능성이 존재하며, 이에 대응하기 위한 감시·통제 체계의 필요성이 대두되고 있다[2].

이에 본 논문에서는 DJI 드론의 OcuSync 기반 OFDM 신호에 기존 오버샘플링 계수 추정 기법을 적용하고, 시플레이션을 통해 샘플링 주파수 추정의 타당성을 검증하였다. 이는 효과적인 드론 감시 및 통제 체계 구축을 위한 기술적 기초를 제공한다.

II. 본론

본 논문에서는 테스트를 위한 신호로서 DJI 사의 OcuSync 프로토콜 신호를 생성하기 위해 참고문헌 [3]의 OFDM 파라미터를 기반으로 프레임당 9 개의 OFDM 심볼로 이루어진 송신 신호를 구성하였다. 이때, 첫 번째와 아홉 번째 심볼에는 80 샘플, 나머지 심볼에는 72 샘플의 순환 접두사(Cyclic Prefix, CP)를 적용하였다. 또한 프레임 내 네 번째와 여섯번째 심볼에는 OcuSync 프로토콜에서 사용되는 Zadoff-Chu

시퀀스를 삽입하였다. 이러한 구조를 갖는 한 프레임의 스펙트로그램은 그림 1 과 같다.

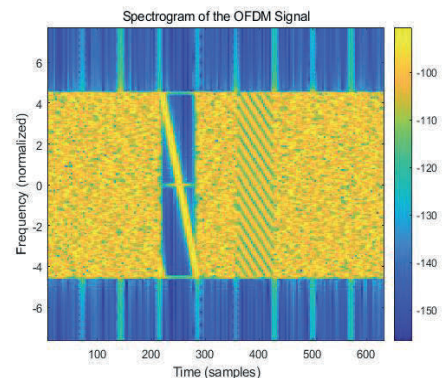


그림 1. OcuSync 프로토콜 기반 임의 생성 신호의 스펙트로그램

각 프레임은 일정 길이의 제로 패딩으로 분리되며, 최종적으로 다수의 프레임이 연속된 형태로 구성된 OcuSync 프로토콜 신호를 생성하였다. OcuSync 프로토콜에 따른 OFDM 샘플 레이트(sample rate)는 15.36 Msps 이며, 본 논문에서는 이를 40 MHz 의 샘플링 주파수를 갖는 광대역 수신기가 수신하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 오버샘플링 계수 q 는 $\frac{40 \text{ MHz}}{15.36 \text{ MHz}} \approx 2.6$ 이며, 15.36Msps 로 생성한 OcuSync 프로토콜 기반 OFDM 신호를 오버샘플링하였다. 이후 본 논문에서는 참고문헌 [4]의 오버샘플링 계수 추정 기법을 활용하여 OcuSync 프로토콜 신호의 원래 샘플링 주파수를 블라인드 방식으로 추정하였다.

해당 기법은 신호가 갖는 Cyclostationarity 성질 중에서도 자기상관 함수의 주기성을 기반으로 한다. Cyclostationary 신호는 특정 지연시간 τ 에 대해 자기상관 함수 $c(n, \tau)$ 가 주기성을 나타내는 특성을 가지므로, Fourier 전개를 통해 신호가 갖는 주기성을 분석할 수 있으며, 이를 통해 오버샘플링 계수를 추출할

수 있다. 다음 수식 (1)과 (2)는 자기 상관 함수 $c(n, \tau)$ 의 Fourier 급수 전개를 나타낸다.

$$c(n, \tau) = \sum_{k=0}^{M-1} C(\alpha_k, \tau) e^{j\alpha_k n} \quad (1)$$

$$C(\alpha_k, \tau) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} c(n, \tau) e^{-j\alpha_k n} \quad (2)$$

여기서 $C(\alpha_k, \tau)$ 는 주기 주파수 α_k 에 대응하는 사이클릭 자기상관 성분이며, M 은 신호의 길이를 의미한다.

이러한 Cyclostationarity 성질을 바탕으로, 오버샘플링 계수를 추정하기 위한 알고리즘의 절차는 다음과 같다. 먼저, 신호 $x(n)$ 에 대해 각 시간 지연 τ 에 대해 $c(n, \tau) = x(n) \cdot x^*(n + \tau)$ 를 계산한 후, 이를 주파수 영역으로 변환하기 위해 FFT를 수행한다. 이후, 양의 주파수 성분 $C_{pos}(\alpha_k, \tau)$ 와 음의 주파수 성분 $C_{neg}(\alpha_k, \tau)$ 를 각각 분리하고 이를 기반으로 수식 (3)과 같은 비용 함수를 정의한다.

$$\hat{\alpha}_k = \underset{\alpha_k}{\operatorname{argmax}} \left[|C_{pos}(\alpha_k, \tau) + C_{neg}^*(-\alpha_k, \tau)|^2 \right] \quad (3)$$

여기서 α_k 는 전체 주기 주파수 구간인 $[0, \pi]$ 에서 DC 및 DC와 인접한 주기 주파수를 제외한 영역에 속한다. 또한 Cyclostationary 신호의 자기상관 함수의 DFT 결과는 주파수 축에서 결레 대칭성을 가지며, 이러한 성질을 이용해 양의 주파수 성분과 음의 주파수 성분을 결합한다. 다음으로 주어진 비용 함수를 최대화하는 α_k 와 τ 를 찾아 해당하는 주기 주파수 $\hat{\alpha}_k$ 를 구한다. 이후, 오버샘플링 계수 \hat{q} 는 수식 (4)와 같이 추정된다.

$$\hat{q} = \frac{2\pi}{\hat{\alpha}_k} \quad (4)$$

수식 (3)으로부터 얻은 주기 주파수 $\hat{\alpha}_k$ 에 해당하는 시간 지연 $\hat{\tau}$ 에 대해서 주파수 성분의 분포를 관찰하였다. 그림 2는 시간 지연 $\hat{\tau}$ 에서의 자기상관 함수 $c(n, \tau)$ 의 주파수 영역 스펙트럼인 $C(\alpha_k, \hat{\tau})$ ($-\pi > \alpha_k > \pi$)의 크기를 나타낸 그래프로, 자기 상관 함수의 스펙트럼을 나타낸다.

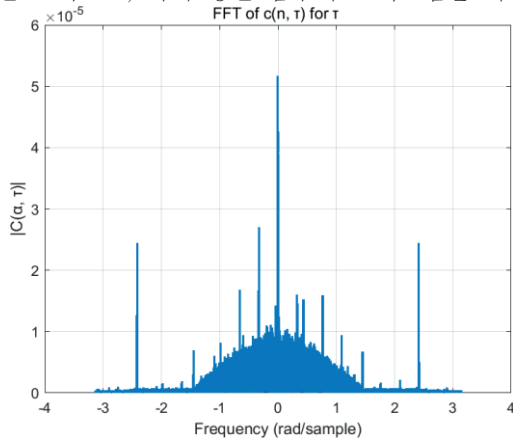


그림 2. 시간 지연 $\hat{\tau}$ 에서의 자기상관 함수의 주파수 영역 크기

그림 3은 양의 주파수 성분 $C_{pos}(\alpha_k, \hat{\tau})$ 과 음의 주파수 성분 $C_{neg}(\alpha_k, \hat{\tau})$ 을 conjugate 대칭으로 결합한 $|C_{pos}(\alpha_k, \tau) + C_{neg}^*(-\alpha_k, \tau)|^2$ 을 계산하여 주기 주파수 $\alpha_k \in (0, \pi]$ 에 대해 나타낸 결과이다. 그림 3에서 DC 성분 및 DC와 인접한 주기 주파수 성분을 제외한 뚜렷한 주기 주파수 성분은 주기 주파수 $\hat{\alpha}_k \approx 2.41658$ 에서 나타났다. 이 값을 수식 (4)에 대입하면 오버샘플링 계수는 $\hat{q} = \frac{2\pi}{\hat{\alpha}_k} \approx 2.6$ 으로 계산된다. 이는 본 시뮬레이션에서 설정한 OcuSync 신호에 대해 적용한 오버샘플링 계수인 2.6과 매우 근접한 결과로, 본 알고리즘이 오버샘플링 계수를 올바르게 추정했음을

확인할 수 있다. 또한, 추정된 오버샘플링 계수를 통해 송신 신호의 샘플링 주파수도 추정할 수 있다.

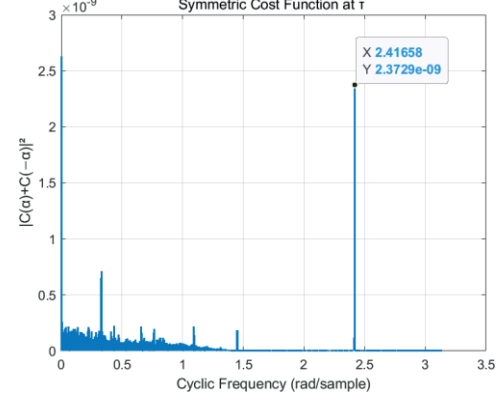


그림 3. 시간 지연 $\hat{\tau}$ 에서의 $|C_{pos}(\alpha_k, \tau) + C_{neg}^*(-\alpha_k, \tau)|^2$

III. 결론

본 논문에서는 OcuSync 프로토콜 기반의 OFDM 신호에 대해 광대역 수신기의 오버샘플링된 신호가 갖는 Cyclostationarity 성질을 이용한 오버샘플링 계수 추정 기법을 적용하였다. 주기 주파수 분석을 통해 오버샘플링 계수와 원래의 샘플링 주파수를 추정할 수 있음을 확인하였다. 향후에는 본 기법을 실제 캡처된 OcuSync 드론 신호에 적용하여 그 유효성을 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 국립한국해양대학교의 "연구·기술개발 지원사업"의 지원을 받아 수행된 결과임(통신 신호 분석을 통한 드론 식별 기술 개발).

참 고 문 헌

- [1] 김혜주, "특허 분석을 통한 중국 드론 기업의 혁신 전략 연구 - DJI社를 중심으로 -," 기계산업연구, vol. 1, no. 2, pp. 53-73, 2022.
- [2] 손현종, "국가중요시설 드론 테러에 대한 Risk 평가에 관한 연구: 드론의 위험성과 시설의 취약성 분석 중심으로," 경찰학연구, vol. 23, no. 2, pp. 199-228, 2023.
- [3] C. Bender, "DJI drone IDs are not encrypted," *arXiv preprint arXiv:2207.10795*, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.10795>
- [4] Q. Chen, X. Wang, P. Ho and Y. Wu, "Progressive Automatic Detection of OFDM System Parameters for Universal Mobile DTV Receiver," *2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall*, Ottawa, ON, Canada, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECF.2010.5594369.