

공중 통신용 OFDM 웨이브폼 설계

엄준수, 김현민, 신오순

승실대학교

jseom@soongsil.ac.kr, {hminplus, osshin}@ssu.ac.kr

OFDM Waveform Design for Air-to-Air Communications

Joon-Soo Eom, Hyeon Min Kim, Oh-Soon Shin

Soongsil University

요 약

Air-to-Air 공중 통신에서 간섭을 최소화하기 위해 Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)과 Flexible Slot 구조를 기반으로 채널 상태 및 데이터 전송속도에 따라 부반송파(Subcarrier) 간격과 Cyclic Prefix의 비율을 조절하는 다중 Numerology 구조 OFDM 웨이브폼의 필요성을 모의실험 결과와 함께 제시한다.

I. 서 론

저렴한 비용과 높은 이동성을 갖는 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)는 기상 관측, 자연재해 감지, 교통 통제, 화물 운반, 네트워크 커버리지 확장 등 다양한 사용할 수 있다[1], [2]. UAV 간의 Air-to-Air 공중 통신 환경은 강한 Line-of-Sight (LoS)와 송·수신기가 모두 고고도에서 자유로운 이동성을 갖는다는 점 등 일반적인 지상 통신과는 다른 특성을 갖는다. 특히, UAV의 고속 이동성은 큰 Doppler 주파수를 야기하고 이는 급격한 채널 변화를 초래하여 통신 성능을 심각하게 저하시킬 수 있다.

본 논문에서는 Air-to-Air 공중 통신에서의 간섭을 최소화하기 위해서 채널 상태 및 데이터 전송속도에 따라 Subcarrier 간격과 그에 따른 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 심볼 길이를 조절하고, 또한 Cyclic Prefix (CP)의 비율을 채널 상황에 적합하도록 조절하는 다중 Numerology 구조 OFDM 웨이브폼의 필요성을 제시하고 이를 뒷받침할 수 있는 모의실험 결과를 제시한다.

II. 공중 통신용 OFDM Waveform

본 논문에서 고려한 OFDM 통신 프레임은 5G NR (New Radio)의 물리계층 규격을 참고하여 설계하였다[3]. 가장 큰 특징은 Scalable OFDM과 Flexible Slot 구조이다. Scalable OFDM은 부반송파(Subcarrier)의 간격을 변경할 수 있으며, 부반송파 간격에 따라 Slot의 길이도 변경되는 구조이다. 따라서 채널 상황 혹은 데이터 전송속도에 따라 OFDM의 부반송파 간격을 변경할 수 있는 Numerology를 구현할 수 있다. 한 프레임의 길이는 10ms이며, 서브프레임의 길이는 1ms로 한 프레임에 10개의 서브프레임이 존재한다. 서브프레임은 여러 개의 Slot으로 구성되는데 Slot의 개수 및 길이는 부반송파 간격에 따라 결정된다. 그림 1과 같이 15kHz 부반송파 간격에서는 한 개의 Slot이 서브프레임에 존재하며, 하나의 Slot은 14개의 OFDM 심볼(Symbol)로 구성된다. 부반송파 간격이 30kHz일 때는 한 서브프레임 내에 2개의 Slot이 존재하게 되며 총 28개의 OFDM S 심볼로 구성된다. 즉, Subcarrier 간격을 넓게 설정할 경우 하나의 프레임에 더 많은 Slot이 전송되도록 설정할 수 있다. 또한 하나의 프레임에 서로 다른 Subcarrier의 간격을 갖는 Inter-Numerology 통신 방식이 구현

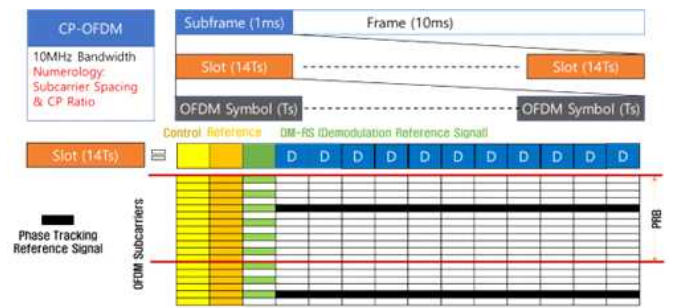
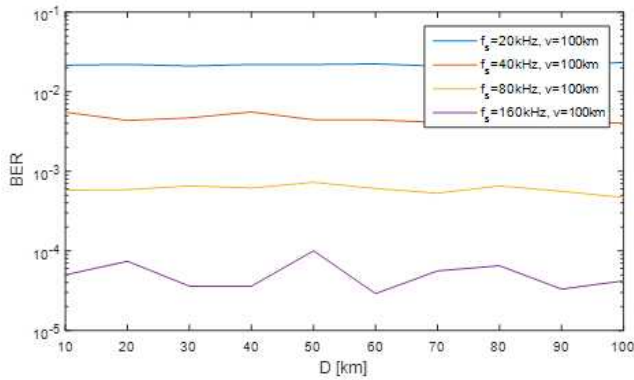


그림 1. 공중 통신용 OFDM 프레임 구조

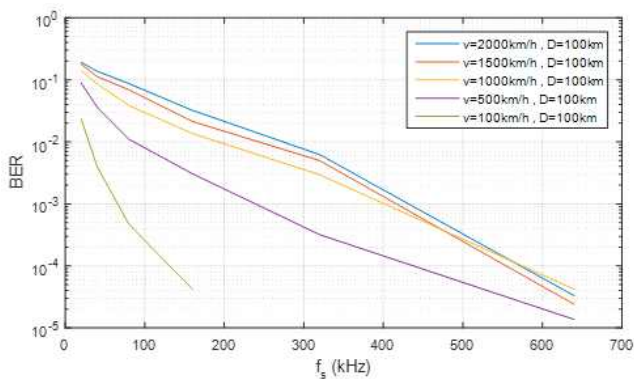
가능하다[4]. 하나의 Slot은 14개의 OFDM 심볼로 구성되어 있는데 Latency를 획기적으로 낮추기 위해 Self-Contained Slot 구조[5]를 적용하였다. Self-Contained Slot 구조는 하나의 Slot에 사용자 데이터와 제어 채널이 동시에 전송되는 구조이다. 하나의 Slot 안에 제어 신호와 사용자 데이터, 응답 데이터가 모두 포함되어 전송되어 Latency를 줄일 수 있다. 통신 자원의 최소 단위(PRB: Physical Resource Block)는 한 개의 Slot과 12개의 부반송파로 구성된다. 한 PRB의 5번째 부반송파에 존재하는 PT-RS (Phase Tracking-Reference Signal)는 OFDM 신호를 생성할 때 발생하는 오실레이터 위상잡음을 보상하기 위한 Reference 신호이며, 3번째 OFDM 심볼에 존재하는 DM-RS (Demodulation Reference Signal)는 Demodulation에 필요한 채널 추정에 사용되는 신호이다. 무선 채널을 통과한 후 수신된 ℓ 번째 OFDM 심볼은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$y_{\ell}[n] = x_{\ell}[n] * h_{\ell}[n] + z_{\ell}[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h_{\ell}[m] x_{\ell}[n-m] + z_{\ell}[n] \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 바와 같이 수신된 OFDM 심볼은 송신 심볼과 무선 채널의 Convolution으로 주어지고 이는 무선 채널의 시간 지연에 따른 OFDM 심볼의 지연을 유발한다. 즉, 다중 경로에 의해 긴 Impulse 응답을 갖는 채널의 경우 이전 OFDM 심볼이 현재 OFDM 심볼에 간섭을 주는 ISI (Inter-Symbol Interference)와 부반송파 간의 직교성 손실로 인한 ICI (Inter-Carrier Interference)가 발생한다. 이러한 간섭 문제를 해결하기 위해 일반적으로 OFDM 심볼 앞 부분에 보호 구간인 CP (Cyclic Prefix)



(a)



(b)

그림 2. 채널 특성에 따른 OFDM 성능 변화

를 붙인다. CP의 길이를 채널의 최대 지연시간보다 크게 설정하는 경우 ISI와 ICI가 발생하지 않으며, CP의 길이가 채널의 최대 지연시간보다 짧게 설정하는 경우 ISI와 ICI가 발생하여 시스템 성능이 열화된다.

III. 다중 Numerology 적용의 필요성

공중 통신 채널에서는 비행체의 고도와 통신 반경에 따라 지연시간이 달라진다. CP와 관련된 중요한 파라미터는 OFDM 심볼 길이 대비 CP 길이 비율이다. 간단히 CP 비율이라 표현한다면, CP 비율이 커질수록 시스템 효율이 낮아지기 때문에 LTE와 5G NR과 같은 OFDM 시스템에서는 일반적으로 CP 비율 (Normal CP인 경우)을 7%로 사용한다. 따라서 적절한 CP의 길이를 설정하기 위해서는 정확한 채널 모델링이 필수적이라는 것을 의미한다. Subcarrier 간격에 따른 OFDM 심볼 길이와 CP 비율을 여러 채널 상황에 적합하도록 적절히 조절하는 다중 Numerology를 구현이 필요하다.

그림 2(a)는 송수신기의 상대속도가 100km/h, 송신 UAV의 고도는 6km, 수신 UAV의 고도는 1km인 경우 Code Rate 1/2, 16-QAM의 통신 거리에 따른 Bit Error Rate (BER) 성능을 보여준다. 채널 모델은 [6]에서 도출한 공중 통신 채널 모델을 기반으로 3D Beamforming 채널 모델을 수립하여 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 3차원 Beamforming 환경에서는 거리에 따른 성능 변화가 미미한 것을 확인할 수 있다. Beamforming으로 인해 LoS 성분이 강하고, 반사파의 크기가 무시할 수 있을 정도이기 때문에 다른 모델과는 달리 넓은 Subcarrier 간격을 사용했을 때, 즉 보다 짧은 OFDM 심볼 길이를 가질 때 BER 성능이 향상됨을 알 수 있다. 따라서 3D Beamforming 모델에서는 시간 지연에 따른 성능 변화는 미미하며, Doppler 효과가 성능을 결정한다.

그림 2(b)는 3D Beamforming 시간 지연 모델과 Ray 도플러 확산 모델에서 Subcarrier 간격과 상대 속도에 따른 BER 성능을 보여준다. 통신 반경은 100km이며, 송신 UAV의 고도는 18km, 수신 UAV의 고도는 6km로 설정하였다. 각 UAV는 24×4 Planar Antenna Array 통해 송수신한다. 속도가 증가함에 따라 도플러 확산 영향이 커져서 BER이 상승하지만, 부반송파 간격이 커질수록 도플러 효과의 영향에 강인해짐을 확인할 수 있다. 상대속도 1000km/h 이상 고속의 통신 환경에서는 600kHz 이상의 부반송파 간격을 사용해야 10^{-4} 이하의 BER 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 상대속도에 따른 적절한 부반송파 간격 조절을 통해 BER 성능을 향상시킬 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 Air-to-Air 공중 통신에서 고속 및 장거리 통신을 하는 상황에서 간섭을 최소화하기 위해서 Scalable OFDM과 Flexible Slot 구조를 통하여 채널 상태 혹은 데이터 속도에 따라 Subcarrier 간격에 따른 OFDM의 심볼 길이와 Cyclic Prefix (CP)의 비율을 여러 채널 상황에 적합하도록 조절하는 다중 Numerology 구조를 고려하고 모의실험을 통하여 시간지연과 도플러 확산에 대한 OFDM 구조의 성능을 평가하였다. 시간지연의 경우 거리에 따른 성능 변화가 미미한 것을 확인했다. 도플러 확산의 경우 송수신기 간의 상대속도가 증가함에 따라 도플러 확산 영향이 커져 BER이 상승하지만, 부반송파 간격이 커질수록 도플러 효과의 영향에 강인해짐을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1084834).

참고 문헌

- [1] R. Shahzadi *et al.*, "UAV assisted 5G and beyond wireless networks: A survey," *J. Netw. & Comput. Appl.*, vol. 189, 103114, Sept. 2021.
- [2] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2016.
- [3] 3GPP, "NR Physical channels and modulation," TS 38.211, June 2018.
- [4] A. A. Zaidi *et al.*, "Waveform and numerology to support 5G services and requirements," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 90–98, Nov. 2016.
- [5] S. Lagen and L. Giupponi, "Listen before receive for coexistence in unlicensed mmWave bands," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC) 2018*, Barcelona, Spain, Apr. 2018, pp. 1–6.
- [6] 엄준수, 강길모, 신요안, 신오순, 박재수, 최효기, 황찬호, "UAV 공중 통신을 위한 Air-to-Air 채널 모델링 및 OFDM 시스템 성능 평가," *전자공학회논문지*, 제 57권 3호, pp. 126–134, 2020년 3월.