

비지상네트워크에서 LoS-MIMO 기반 유니버설 공간-주파수 분할 다중 접속

김 종 현*, 김 광 순°

Universal Spatio-Frequency Division Multiple Access Using LoS-MIMO in Non-Terrestrial Networks

Jonghyun Kim*, Kwang Soon Kim°

요 약

본 논문에서는 UAV 기지국의 비지상네트워크에서 LoS-MIMO를 활용하여 상향링크 군통신 서비스를 높은 주파수 효율로 지원하기 위하여 유니버설 공간-주파수 분할 다중접속 웨이브폼을 제안하며, USFDMA 웨이브폼은 이동성에 강한 특성을 LoS-MIMO 채널 환경에서 CP 길이를 크게 줄일 수 있어 기존의 MIMO-OFDMA 웨이브폼 대비 높은 주파수 효율을 얻을 수 있음을 보였다.

Key Words : NTN, UAV, LoS-MIMO, URLLC, waveform.

ABSTRACT

In this paper, we proposed USFDMA waveform using LoS-MIMO in an UAV-based non-terrestrial network. Due to a spatio-frequency filter and a time-domain window, the USFDMA waveform has a reduced CP length even with sync errors of mobile users; therefore, the USFDMA achieves high spectral efficiency performance, compared to the conventional MIMO-OFDMA waveform.

1. 서 론

군 지휘통제 시스템의 공중중계체계를 위해서는 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV) 기지국을 활용한 비지상네트워크를 통해 군통신 서비스가 지원되어야 한다. 또한 군통신 서비스는 정보의 정확성과 신속성을 위해 셀룰러 이동통신에서의 고신뢰 저지연 통신 (ultra-reliable low-latency communication, URLLC) 서비스 요구조건을 만족시킬 수 있어야 하고, 새로운 사물인터넷 서비스 등의 기술 적용을 위해 고용량의 데이터 전송 또한 가능하여야 한다^[1].

UAV 기지국은 LoS (line-of-sight) 경로를 확보하기가 쉽고^[2], 밀리미터 등 짧은 파장의 반송파와 함께 이중 편광(dual-polarized) 등의 안테나 패턴을 활용하여 LoS-MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템을 구성함으로써 주파수 효율을 높일 수 있다^[3]. 또한 LoS 위주의 채널에서는 다중 경로 페이딩 (multi-path fading)에 의한 인접한 신호 간섭이 줄기 때문에 짧은 길이의 CP(cyclic prefix)를 사용할 수 있다. 그러나 이동성이 존재할 때 사용자 간 동기오차에 의한 신호 품질 저하를 방지하기 위해서는, 기존 OFDM (orthogonal frequency division multiplex) 웨이브폼에서 이를 고려한 CP 길이가 확보되어야 한다. CP 비율만큼 주파수 효율성은 저하되므로, 동기오차에 강한 웨이브폼을 사용하면 CP 길이를 줄여 LoS-MIMO의 높은 주파수 효율을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 높은 주파수 효율의 LoS-MIMO를 UAV 기지국 기반의 비지상 네트워크에서 활용하기 위하여 유니버설 공간-주파수 분할 다중 접속 (universal spatio-frequency division multiple access, USFDMA) 웨이브폼을 제안한다. 다수의 다중입출력 안테나를 갖는 UAV에서 산발적으로 발생하며 URLLC 서비스 조건을 갖는 군통신 서비스를 지원 효율적으로 지원하기 위해서 [4]와 같은 무허가 다중접속과 [5]와 같은 웨이브폼 수신단을 가정했고, UAV 기반의 밀리미터 LoS-MIMO 채널환경에서 제안하는 USFDMA 웨이브폼은 MIMO-OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) 대비 CP 길이를 줄일 수 있어 주파수 고효율성을 달성할 수 있음을 보였다.

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD190033ED).

• First Author : (ORCID:0000-0001-9432-2972)School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, jonghyun.kim@yonsei.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-5706-174X)School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, ks.kim@yonsei.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202209-216-A-LU, Received September 20, 2022; Revised September 21, 2022; Accepted September 21, 2022

II. LoS-MIMO를 활용한 NTN 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 LoS-MIMO를 활용하여 상향링크 URLLC 군통신 서비스를 지원하기 위한 UAV 통신 시스템을 가정한다. UAV 기지국은 이중 편광 안테나들로 구성된 UPA(uniform planar array) 안테나를 장착하고 사용자 단말들도 이중 편광 안테나를 사용함으로써 밀리미터파 대역 등 짧은 파장을 갖는 반송파를 통해서 LoS-MIMO를 활용하는 시스템 모델을 가정한다.

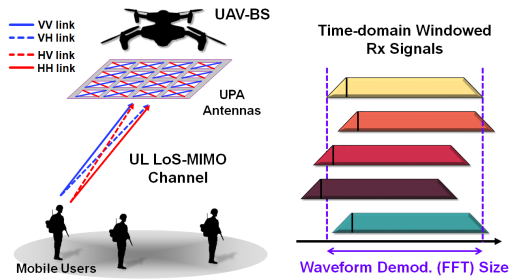


그림 1. 상향링크 LoS-MIMO 기반의 NTN 시스템 및 USFDMA 웨이브폼의 시간 윈도우 적용 신호 모형.
Fig. 1. Uplink LoS-MIMO UAV-based NTN and time-windowed signals of the USFDMA.

III. 주파수 고효율 USFDMA 웨이브폼

일반적인 OFDM 기반의 여러 웨이브폼 구조에서 CP는 다중경로 페이딩에 의한 인접 심볼 간섭을 해결하기 위하여 사용되지만, 전체 심볼 길이에서 CP 길이가 차지하는 비율만큼 데이터 전송에서의 주파수 효율성을 떨어뜨리는 단점이 있다. 기존 3GPP 채널 모형에서 지수적 감쇠하는 PDP(power delay profile)를 가질 때에는 RMS (root mean square) 지연 분산 (delay spread)의 약 3배 정도의 CP 길이가 최적이다^[6]. 한편, LoS 환경에서는 채널 이득(channel gain)이 최단 경로인 LoS에 대부분 집중되고 NLoS (non-LoS) 경로를 통한 신호 전력은 매우 작아 다중 경로 페이딩이 크지 않으므로 CP를 줄여도 필요한 SINR(signal-to-noise-and-interference ratio)을 달성할 수 있다. 그러나, 이동성을 갖는 NTN에서는 사용자별로 제각각의 동기 오차가 발생한 채로 UAV 기지국에 신호들이 수신되기 때문에 OFDM 웨이브폼에서는 동기 오차를 고려한 CP 길이가 확보되어야 한다. USFDMA 웨이브폼에서도 그림 1과 같이 CP에 맞추어 시간 축 윈도우가 구성되어야 하나, USFDMA 웨

이브폼에서는 매 수신 심볼의 앞부분과 뒷부분의 윈도우 적용된 신호를 더하여 웨이브폼 복조를 수행하므로 동기오차에 의해서 웨이브폼의 앞부분이나 뒷부분이 웨이브폼 복조 사이즈를 이탈하여도 다른 한쪽 신호가 합산되므로 사용자들 각각의 동기오차를 알지 못하더라도 신호 복조가 가능하다. 따라서 사용자 간의 동기오차에 강인한만큼 CP 길이를 최소화할 수 있어 이동성 환경에서도 LoS-MIMO의 주파수 고효율을 달성할 수 있다.

IV. 성능 비교 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 USFDMA와 비교대상인 MIMO-OFDMA의 주파수 효율성을 28GHz 밀리미터파 대역에서의 LoS-MIMO 시스템을 앞선 시스템 모형과 같이 구성하여 3GPP TR 38.901^[7]의 RMa 환경에서 실험하였다. UAV-BS 기지국은 고도 100m에 위치하며 5-20m/s 속도로 이동하고 가로 8줄 및 세로 4줄의 직사각형 UPA 구조의 이중 편파 안테나를 사용한다. 셀 안에는 250대의 사용자 단말이 반경 250m 내에 존재하며, 이중 편파 안테나로 2개 스트림의 16-QAM (quadrature amplitude modulation) 심볼을 전송하고, 데이터 전송 확률은 5%이다. 발생한 채널의 최대 딜레이인 2us를 고려하여, 동기 기준점에 대해 선행 또는 후행하는 수신 심볼들의 동기오차는 최대가 0us에서 1us까지인 균등분포를 따르도록 가정했고, 발생한 채널의 RMS 지연 분산은 τ_r 표기했다. 그림 2는 MIMO-OFDMA의 주파수 효율성을 최대 동기오차 및 CP 길이에 따라 실험한 것이다. 최대 동기오차가 증가하면 MIMO-OFDMA의 주파수 효율성은 신호손실에 의해 감소하지만, CP 길이의 경우에는 τ 와 같을 때 가장 높은 주파수 효율성을 달성하고

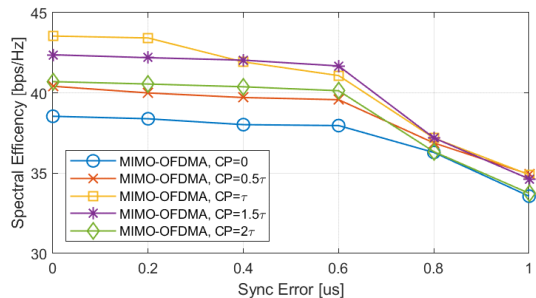


그림 2. MIMO-OFDMA의 동기오차 및 CP 길이에 따른 주파수 효율성.
Fig. 2. Spectral efficiency of MIMO-OFDMA with sync error and CP lengths.

이보다 작을 때에는 동기오차에 의한 신호손실로 성능이 떨어지며 반대로 이보다 클 때는 CP 오버헤드로 효율성이 떨어지게 된다. 그림 3은 USFDMA 웨이브폼을 사용하였을 때의 주파수 효율성 실험 결과이다. USFDMA에서는 시간 축 윈도우를 사용하기 때문에 사용자 단말 간의 동기오차에 의한 신호 손실에 강인하므로 0.05τ 의 짧은 CP 길이에서 최대의 주파수 효율성을 달성할 수 있다. 그림 4에서는 USFDMA와 MIMO-OFDMA의 주파수 효율성을 비교하였다. 동기오차가 작으면 USFDMA 웨이브폼이 MIMO-OFDMA 대비 다소 낮은 주파수 효율성을 갖지만, 동기오차가 커지게 되면 더 큰 주파수 효율성을 가지며 성능 차이 또한 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

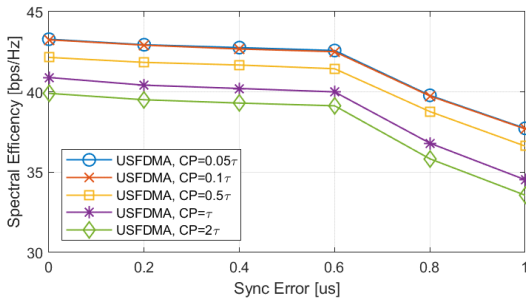


그림 3. USFDMA의 동기오차 및 CP길이에 따른 주파수 효율성.
Fig. 3. Spectral efficiency of the proposed USFDMA with sync error and CP lengths.

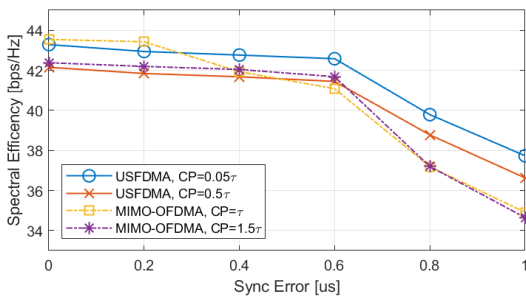


그림 4. USFDMA와 MIMO-OFDMA의 주파수 효율성.
Fig. 4. Spectral efficiency of the proposed USFDMA and MIMO-OFDMA.

V. 결론

본 논문에서는 제안하는 USFDMA 웨이브폼이 사용자 간 동기오차에 강인한 특성 덕에 LoS-MIMO 채널환경에서 MIMO-OFDMA 대비 CP 길이를 줄일 수 있어 높은 주파수 효율을 달성할 수 있음을 보였다.

References

- [1] M. Tortonesi, et al., "Leveraging internet of things within the military network environment - Challenges and solutions," in *Proc. IEEE 3rd WF-IoT*, pp. 111-116, Dec. 2016. (<https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2016.7845503>)
- [2] S. Voh, T. Jung, K. S. Kim, C.-B. Chae, S. B. Um, and J. W. Choi, "UAV channel models: A survey and performance evaluation," *J. KICS*, vol. 43, no. 2, pp. 352-362, Feb. 2018. (<http://doi.org/10.7840/kics.2018.43.2.352>)
- [3] O. Jo, et al., "Exploitation of dual-polarization diversity for 5G millimeter-wave MIMO beamforming systems," in *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6646-6655, Dec. 2017. (<https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2761979>)
- [4] K. S. Kim, et al., "Ultrareliable and low-latency communication techniques for Tactile Internet services," in *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 376-393, Feb. 2019. (<https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2868995>)
- [5] J. Kim and K. S. Kim, "Universal spatio-frequency division multiple access scheme for uplink URLLC in non-terrestrial networks," *J. KICS*, vol. 46, no. 5, pp. 818-820, May 2021. (<http://doi.org/10.7840/kics.2021.46.5.818>)
- [6] A. A. Al-jzari, I. Kostanic, and K. H. M. Mabrok, "Effect of variable cyclic prefix length on OFDM system performance over different wireless channel models," *Univers. J. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 1, pp. 7-14, Feb. 2015. (<http://doi.org/10.13189/ujcn.2015.030102>)
- [7] 3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*, document TR 38.901, Rev. 17.0.0, 3GPP, Mar. 2022.