

# 비지상네트워크에서 상향링크 URLLC를 위한 유니버설 공간-주파수 분할 다중 접속 방식

김 종 현\*, 김 광 순<sup>o</sup>

## Universal Spatio-Frequency Division Multiple Access Scheme for Uplink URLLC in Non-Terrestrial Networks

Jonghyun Kim\*, Kwang Soon Kim<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 다중안테나 UAV 기지국의 비지상네트워크에서 지상의 노드들에 상향링크 URLLC 군통신 서비스를 제공하기 위한 웨이브폼으로 공간-주파수 필터 및 시간 축 윈도우를 사용하는 USFDMA를 제안하며, MIMO-OFDMA와의 비교 시뮬레이션을 통해 비동기 간섭에 강인한 특성으로 단말별 동기오차가 발생하는 환경에서 산발적으로 발생하는 고용량 URLLC 서비스에 활용 가능성을 보였다.

**Key Words** : NTN, UAV, Uplink MU-MIMO, URLLC, waveform

### ABSTRACT

In this paper, we proposed USFDMA waveform for uplink military communication services in a non-terrestrial network, to alleviate the performance degradation caused from synchronization error due to the mobility of a UAV-BS and users. Link-level simulation results showed that the proposed USFDMA achieves much more robustness to the sync error than the conventional MIMO-OFDMA, which implies that sporadic but high data rate

URLLC services even in asynchronous UAV-BS environments can be supported.

### 1. 서 론

국방 ICT 기술은 전투작전이 점차 다양한 전장환경에서 전투원 간의 실시간 정보교환을 기반으로 하는 네트워크 중심전으로 변화함에 따라, 통합된 전투 지휘체계 아래에서 혼합현실 (mixed reality, MR) 등 새로운 컴퓨팅 및 통신기술들을 응용하는 방향으로 발전하고 있다<sup>1)</sup>. 이 같은 전투지휘체계를 위한 무선 네트워크 구축에 있어, 위성 또는 UAV(unmanned aerial vehicle)를 활용한 비지상네트워크(non-terrestrial network, NTN)를 구축하게 되면 지형의 제약 없이 통신 인프라가 갖추어져 있지 않은 곳에서 통신 서비스를 제공할 수 있으며<sup>2)</sup>, UAV 기지국에 다중 안테나를 사용하는 MIMO (multiple-input and multiple-output) 시스템으로 여러 사용자를 동일 시간-주파수 자원으로 서비스하기 위한 다중접속 기술들도 연구되고 있다<sup>3)</sup>. 이러한 NTN 기술에 관한 표준화는 3GPP NR 기반으로 진행 중이고, 5G의 서비스들을 NTN에서도 지원하는 것을 포함하고 있다<sup>4)</sup>.

전장상황에서의 군통신 서비스는 실시간 정보교환과 즉각적인 대응을 위해서 높은 신뢰도와 낮은 지연 시간을 갖는 고신뢰 저지연 통신 (ultrareliable low-latency communication, URLLC) 특성을 기본적으로 만족시킬 수 있어야 하고, 고해상도와 고주사율의 영상 데이터를 포함하는 혼합현실 서비스까지 지원하기 위해 고용량의 데이터 전송도 필요하며, 데이터의 발생이 사건 기반(event-driven)으로 발생할 수 있다는 점도 함께 고려되어야 한다. 이처럼 고용량의 URLLC 데이터 전송이 산발적(sporadic)으로 발생하는 서비스를 지상 네트워크에서는 무허가 다중접속 (grant-free multiple access, GFMA) 방식으로 사용자들을 최적 스케줄링 그룹으로 나누고 자원할당도 최적화하여 높은 주파수 효율을 얻을 수 있다<sup>5)</sup>. 그러나 NTN에서는 UAV 이동성에 의한 동기오차가 사용자 단말 별로 제각각 발생한 채 기지국에 송신되므로 심플 간 간섭을 일으키는 문제가 발생하고, 모든 단말의

※ 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

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

논문번호 : 202104-082-A-LU, Received April 15, 2021; Revised April 28, 2021; Accepted April 28, 2021

상향링크 동기를 지속적으로 유지하기 위해서는 각 단말에 상향링크 제어채널을 주기적으로 할당하여야 하나, 단말 수가 많고 이동성이 큰 경우에는 제어채널 오버헤드 부담이 커지게 된다.

따라서 현재 상용망의 OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) 웨이브폼은 이동성에 의한 동기오차가 발생 시 성능저하가 크게 발생하므로, UAV 기지국에서 제어채널 부담 없이 상향링크 URLLC 서비스를 제공하기에 적합하지 않다. 이에 반해 최근에 제안된 다중접속 방식인 USFDMA (universal spatio-frequency division multiple access)는 사용자별 공간-주파수 필터를 GFMA의 사용자별 최적 자원할당에 맞추어 다중 사용자 간 간섭을 억제할 수 있으며 시간 축의 윈도우를 적용하여 비동기에 의한 심볼간 간섭을 줄일 수 있는 장점이 있다<sup>6)</sup>.

본 논문에서는 다중안테나 UAV 기지국의 NTN에서 상향링크 URLLC 군통신 서비스를 제공하기 위해 USFDMA 방식의 웨이브폼을 활용하는 다중접속 방식을 제안하며, MIMO-OFDMA 웨이브폼과의 비교 시뮬레이션을 통해 성능 개선을 보였다.

## II. 비지상네트워크 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 상향링크 URLLC 군통신 서비스를 위한 UAV 통신 시스템을 가정한다. 단일 안테나를 갖는 보병들은 혼합현실 전투정보를 공유하는 전투지휘체계에서 제각각의 탐지영역에 대한 영상에서 단말의 인공지능 프로세싱을 통해 도출되는 고용량의 전투정보를 사전 기반에 의해 상향링크로 전송하고, UAV 기지국은 다중안테나를 활용하여 이를 수신하고 중앙서버로 중계하는 역할을 한다. 이러한 상향링크 서비스를 위해 UAV 기지국은 [5]의 GFMA와 같이 무허가 자원(grant-free resources)을

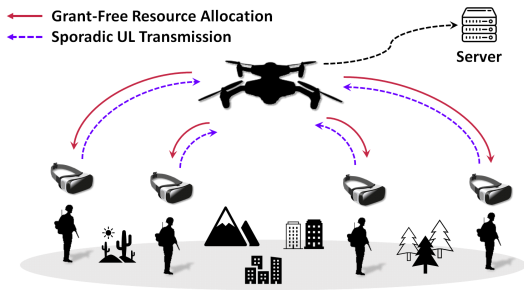


그림 1. 상향링크 군통신을 위한 UAV 기반 NTN 시스템  
Fig. 1. UAV-based NTN for uplink military communication service

각 사용자 단말에 미리 할당시켜 데이터가 발생한 단말이 즉시 전송 완료토록 하며, 각 데이터 전송이 URLLC 성능조건을 만족시키면서도, 고용량 정보전송을 위한 높은 주파수 효율을 갖도록 한다. 이렇게 단말이 미리 할당받은 자원을 통해 임의로 상향링크 전송을 수행하는 한편, 이동성을 갖는 UAV 기지국에서는 수신 신호의 파일럿을 이용하여 추정된 MIMO 채널에 대한 결합(combining) 및 단말별 동기오차 보상 프로세스들을 거쳐서 수신데이터를 복조한다.

## III. USFDMA 웨이브폼

USFDMA는 그림 2와 같이 주파수 영역에서 공간-주파수 필터를 구성함으로써 서로 동기가 맞지 않는 사용자별 자원할당 경계에서 발생하는 간섭을 억제할 수 있다. 그리고 다중 사용자 MIMO 환경에서 다중 안테나를 가지고 있는 기지국에서 상향링크에 대한 MIMO 결합 프로세싱으로 동일 시간-주파수 자원에 대해 다중 사용자들의 공간분할 다중접속을 지원함으로써 높은 주파수 효율을 얻을 수 있고, 주파수 영역에서 샘플 단위로 높은 빔 형성 해상도를 갖는다<sup>6)</sup>. 추가적으로, 시간 축에서 CP (cyclic prefix) 길이를 고려한 윈도우를 구성함으로써 이동성에 의한 동기오차가 발생하였을 때에 시간상 인접한 심볼간 간섭 (inter-symbol interference, ISI)을 억제할 수 있고, MIMO 결합을 위한 FFT (fast Fourier transform) 수행 시 동기오차에 의해 FFT 사이즈 제한을 이탈하여 손실되는 신호량 또한 감소시킬 수 있다. 그러나 시간 축 윈도우를 사용하는 경우에는 윈도우 길이에 비례하여 수신 프로세싱 과정에 잡음 신호가 추가되기 때문에 신호 대 잡음비 손해 또한 발생하게 된다는 단점이 있다.

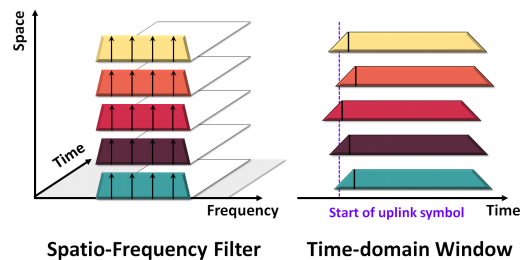


그림 2. USFDMA 공간-주파수 필터 및 시간 축 윈도우 구성  
Fig. 2. USFDMA spatio-frequency filter and time-domain window

#### IV. 성능 비교 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 USFDMA와 비교대상인 MIMO-OFDMA의 BER (bit error rate) 성능 비교 링크 레벨 시뮬레이션을 수행하여 그림 3의 결과를 얻었다. UAV 기지국의 안테나 수는 64개, 이동성은 5m/s~20m/s, 셀 반경은 150m, 비행고도는 80m로 가정하였고, 셀 크기와 UAV 이동성을 고려하여 웨이브폼 파라미터는 3GPP NR TS 38.211 [7]에서 부반송파 간격이 120KHz 이고, CP 길이가 0.57 $\mu$ s인 프레임 구조로 설정하였다. 지상에 750대의 사용자 단말이 위치하고, 매 순간 5%의 발생 확률인 푸아송 분포이면서 전송용량이 100Mbps인 데이터 전송이 발생하며, 이를 위한 [5]의 GFMA 자원할당을 수행하였다. 수신된 신호는 MIMO 결합 및 동기오차 보상을 거쳐서 복조하여 BER을 측정하였다. 시뮬레이션에서 동기오차는 균등분포를 갖는 것으로 가정하였으며, 최대 동기오차( $\tau_{max}$ )를 CP 길이의 0%부터 110%까지 10%p 간격으로 증가시켰다. 그림 3과 같이 MIMO-OFDMA는 동기오차가 전혀 없다면 높은 BER 성능을 갖지만, 동기오차가 점차 커질수록 인접 자원 사이의 간섭과 ISI에 의해 BER 성능이 급격히 나빠지므로 URLLC의 높은 신뢰도 조건을 만족시키지 못한다. 한편 USFDMA는 완전 동기 시에는 시간 축 윈도우에 의한 신호 대 잡음비 손해를 MIMO-OFDMA 대비 겪지만, 동기오차가 증가하여도 자원할당 경계의 공간-주파수 필터와 시간 축 윈도우 덕분에 BER 성능이 크게 저하되지 않는 강인성을 가지며, 이러한 강인성은 상향링크 동기 재조정 과정 없이도 정보전송을 고신뢰도로 완료할 수 있게 하고, 재전송을 방지하여 저지연을 지원할 수 있게 한다.

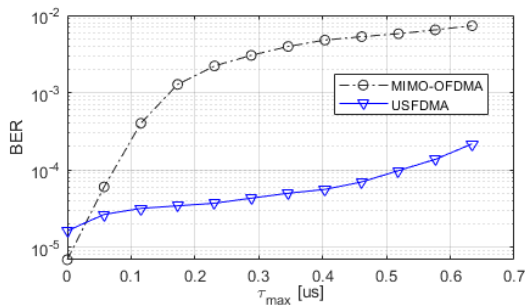


그림 3. USFDMA와 MIMO-OFDMA의 BER 시뮬레이션  
Fig. 3. BER of the USFDMA and the MIMO-OFDMA

#### V. 결론

본 논문에서는 군통신을 위한 UAV 기반 NTN 환경에서 공간-주파수 필터와 시간 축 윈도우를 적용하는 USFDMA 웨이브폼을 사용함으로써, UAV의 이동성에도 불구하고 상향링크에서 URLLC를 위한 고효율 GFMA와 함께 사용하였을 때 동기오차에 강한 전송 신뢰도 성능을 보였다.

#### References

- [1] M. Tortonesi et al., "Leveraging internet of things within the military network environment - Challenges and solutions," in *Proc. IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 111-116, Dec. 2016.
- [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.
- [3] W. Jaafar, et al., "Multiple access in aerial networks: From orthogonal and non-orthogonal to rate-splitting," in *IEEE Open J. Veh. Tech.*, vol. 1, pp. 372-392, 2020.
- [4] J. H. Kim, M. Y. Yoon, D. H. You, and M. S. Lee, "5G wireless communication technology for non-terrestrial network," *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 34, no. 6, Dec. 2019.
- [5] 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.
- [6] J. H. Kim, J. Lee, K. J. Jeon, K. J. Choi, and K. S. Kim, "Universal spatio-frequency division multiple access," in *Proc. KICS Winter Conf.*, vol. 59, no. 1, pp. 437-439, Jan. 2016.
- [7] 3GPP; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; *Physical channels and modulation*, document TS 38.211, Rev. 16.5.0, 3GPP, Mar. 2021.