

초고신뢰 저지연 통신을 위한 웨이브폼 및 다중접속방식 연구 동향

I. 서론

현재 차세대 이동통신 시스템 표준으로 연구개발 중인 5G (IMT-2020)에서는 이전의 4G (IMT-Advanced)와 달리 기술발전에 따른 새로운 사용 시나리오를 전망하고 그에 맞는 서비스에 따라 필요한 핵심 성능 지표 (key performance indicator, KPI)를 나누어 정의하고 있다. ITU-R에 따르면 5G에서 정의하고 있는 8개의 핵심 성능 지표는 <그림 1>에 나타난 것과 같으며^[1], 4G 대비 다양한 성능 지표에서의 성능 향상을 목표로 하고 있다. 이렇게 정의된 핵심 성능 지표는 세 가지 대표적 사용 시나리오인 향상된 광대역 이동통신 (enhanced

초고신뢰 저지연 통신은 5G의 다른 사용 시나리오와는 다르게 빠른 시간에 정보 전송을 반드시 처리해야 하는 (mission-critical) 서비스 특성을 가지고 있다.

mobile broadband, eMBB), 대규모 사물통신 (massive machine type communication, mMTC), 그리고 초고신뢰 저지연 통신 (ultra-reliable and low-latency, UR/LL)에 따라 <그림 2>와 같이 분류할 수 있다^[1].

초고신뢰 저지연 통신 (UR/LL)은 5G의 다른 사용 시나리오와는 다르게 빠른 시간에 정보전송을 반드시 처리해야 하는 (mission-critical) 서비스 특성을 가지고 있다. 단 한 번의 통신 오류 발생으로도 큰 손해가 발생하고 실시간으로 시스템이 동작해야 하기 때문에 초고신뢰성과 저지연성을 동시에 만족시켜야 한다. 따라서 여러 통신 계층에서의 통합적 기술 혁신을 필요로 하고 공공서비스 및 산업 분야에서 높은 기술적 가치를 갖는다.

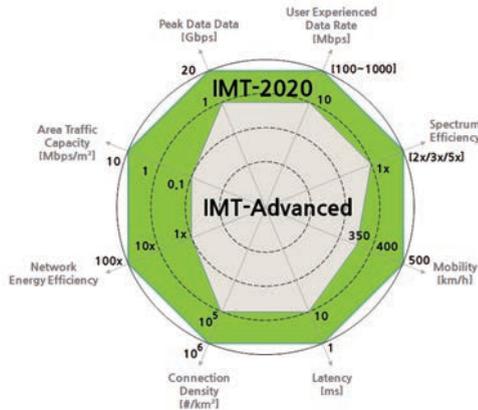
진행 중인 표준에서 요구하는 초고신뢰 저지연 통신 (UR/LL)의 핵



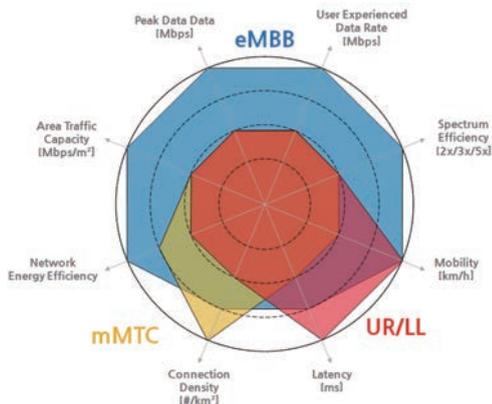
김종현
연세대학교 전기전자공학과



김광순
연세대학교 전기전자공학과



〈그림 1〉 IMT-2020과 IMT-Advanced의 KPI 비교



〈그림 2〉 5G 사용 시나리오 eMBB, mMTC, UR/LL 분류

심 성능 지표는 1ms 이내의 무선 구간 지연시간 내에 초고신뢰성을 가지고 정보를 전송해야 하며 최대 시속 500km의 이동성을 지원해야 한다. 이에 대해 본 연구에서는 초고신뢰 저지연 시나리오에 해당되는 서비스들을 분석하여 데이터 용량에 따라 최대 10Mbps 급의 전송용량까지를 산발적으로 전송해야 하는 초고신뢰 저지연 저용량 서비스 (ultra-reliable low-latency low-throughput, UR/LL/LT)와 최대 100Mbps 급의 전송용량까지를 지속적으로 전송해야 하는 초고신뢰 저지연 고용량 서비스 (ultra-reliable low-latency high throughput, UR/LL/HT)의 두 가지 서비스 카테고리로 다시 분류하였고 그에 따른 기술요구사항을 도출하였다^[2].

초고신뢰 저지연 (저용량) 통신을 요구하는 대표적인 서비스는 자율 주행 자동차, 드론 연결성, 재난 응급통신, 협업로봇 등이다.

본 연구에서는 초고신뢰 저지연 통신을 달성하기 위한 웨이브폼 및 다중접속방식에 대하여 논의한다. 2장에서는 초고신뢰 저지연 통신에 해당하는 서비스들을 두 가지 서비스 범주에 따라 구분하고 각각에 따른 서비스의 기술 지원 환경을 분석한다. 3장에서는 도출된 두 가지 서비스 범주에 대한 웨이브폼 및 다중접속 방식에서의 기술요구사항을 도출한다. 마지막으로 4장에서는 초고신뢰 저지연 통신을 위한 물리계층 기술의 연구방향을 제시한다.

II. 초고신뢰 저지연 서비스 분석

1. 초고신뢰 저지연 저용량 (UR/LL/LT) 서비스

초고신뢰 저지연 저용량 서비스에서는 주로 카메라, GPS 또는 레이더 등의 멀티미디어 센서가 사건을 감지함으로써 주 트래픽이 발생한다. 간헐적이고 산발적인 저용량의 영상정보나 기기간 위치 정보가 상향링크로 전송된다. 5G에서 예상되는 미래 서비스들이 여러 문헌에 소개되고 있으며^{[3]-[5]}, 이 가운데 초고신뢰 저지연 저용량 서비스에 해당되는 것을 〈그림 3〉의 센싱 정보만으로는 순간적인 돌발 상황이 발생하는 것에 대한 대처가 불가능하다. 따라서 이동통신을 통해 주변 교통상황으로부터 정보를 받아야 하며, 이를 위해 각 자율자동차의 상황 정보를 필요시마다 5-10ms의 제어시간 안에 실시간으로 업데이트 해야 하고 안전성을 위해 고신뢰성을 만족시켜야 한다^[3].

드론의 원격 조종을 위해서는 조종 신호와 드론으로부터의 영상정보를 주고받기 위한 무선 이동통신 기술이 필요하다. 영상 전송까지 포함하였을 때에는 10Mbps의 데이터 전송속도가 요구된다. 빠른 속도의 움직임을 제어하기 위해 저지연성과 이동성을 동시에 만족시켜야 하며 원격 조종에 오류가 없도록 고신뢰성이 요구된다^[4].

재해 및 재난 상황에서 생존자가 구조신호를 보내는 재난 응급 통신 (lifeline communication)에도 초고신뢰 저지연 통신이 사용될 수 있다. 생존자의 위치정보와 건강상태에 대한 고신뢰 통신이 이루어져야 하고 낮은 지연시간



〈그림 3〉 UR/LL/LT 서비스 사례 분석



〈그림 4〉 UR/LL/HT 서비스 사례 분석

으로 응급 상황에서의 실시간 대처가 가능해야 한다^[4].

작은 규모의 생산 공장에서는 협업 로봇 (collaborative robots)을 이용하여 노동자들의 작업 생산성과 만족도 및 안전성을 효율적으로 개선시킬 수 있다. 웨어러블 기기 (wearable devices)와 3차원 스캐너 등의 공정 관련 센서와 기술적으로 결합될 수 있으며 제어 시스템의 안정적인 실시간 동작을 위해 통신 지연 시간 1ms 이내의 저지연 통신이 필요하다^[5].

2 초고신뢰 저지연 고용량 (UR/LL/HT) 서비스

초고신뢰 저지연 고용량 서비스에 해당하는 사용 사례에서는 상대적으로 제한된 공간 안에 위치한 여러 단말에서 기기간 또는 인프라를 통한 저지연 고용량 통신을 통해 분산 정보처리 및 제어, 그리고 분산 최적화가 이루어진다. 여기서 멀티미디어 센서는 각 단말로부터 관측되는 최대 100Mbps 급의 고해상도 영상정보를 수집하며, 이를 인프라 또는 단말에서 지속적으로 공유하고, 이를 통한 실시간 분산 제

초고신뢰 저지연 (고용량) 통신을 요구하는 대표적인 서비스는 원격 의료 수술, 실시간 패쇄루프 기계통신, 3차원 증강 현실, 3차원 영상기반 상호작용 서비스 등이다.



어 및 최적화를 수행한다. [5]-[7]에 있는 5G 서비스 미래 기술 가운데 초고신뢰 저지연 고용량 서비스에 해당하는 것을 <그림 4>에 정리하였다.

원격 의료 수술 (tele-surgery)은 일반 병원이나 지역에서 만나기 어려운 특정 분야의 수술 전문의가 공간상의 제약 없이 환자를 치료하는 것을 가능하게 한다. 이 경우 수술 담당 의사가 수술기기를 정교하게 동작시키기 위해서는 통신 과정에서 5-10ms의 지연시간 조건을 만족시켜야 하며, 수술기로부터의 실시간 고해상도 영상 정보와 진행 중인 수술에 필요한 의료정보 등 다양한 종류의 100Mbps 급 고용량 데이터가 99.999%의 높은 신뢰도로 실시간으로 제공되어야 한다^[6].

실시간 폐쇄루프 사물통신(real-time closed loop MTC)은 큰 규모의 자동화 공장 등에서 무결점 생산 및 생산성 최적화를 위한 실시간 제어 시스템에 사용된다. 미래형 공장 (factory of the future, FoF)은 공장 단독으로 독립된 시스템이 아니라 생산부터 소비까지의 거대한 가치사슬 (value chain)에 연결된다. 초고신뢰 저지연 통신은 이를 가능하게 하기 위한 필수 기술이다. 공장 안에서 수십 m/s 이상의 이동성을 가질 수 있는 기계 및 로봇 간의 실시간 기계학습을 통한 공장 최적화를 수행하고 이에 따라 동작을 제어하기 위해 고해상도의 영상정보를 포함하는 데이터를 지속적으로 공유할 필요가 있다^[5].

3차원 증강현실 어플리케이션 (3D augmented reality app)에서는 사용자가 보고 있는 실제 환경에 가상의 3차원 영상정보를 혼합하여 보여줌으로써 증강현실 서비스를 제공한다. 사용자가 증강 현실을 이질감 없이 느낄 수 있도록 지속적인 트래픽 특성을 가지며 저지연성이 만족되어야 하고, 동시에 3차원 영상의 품질을 위해서 고신뢰성과 고용량 데이터 전송속도 조건을 만족시켜야 한다^[7].

또한, 3차원 영상기반 상호작용 (3D video-driven interaction) 서비스는 사용자에게 실시간 3차원 영상정보를 제공하면서 동시에 그에 기반을 둔 상호작용을 가능하게 한다. 실시간 영상정보를 전송하기 위한 고용량 데

이터 전송과 상호작용을 위한 저지연성 및 고신뢰성을 모두 만족시킬 수 있어야 한다^[7].

III. 서비스 별 기술요구사항 도출

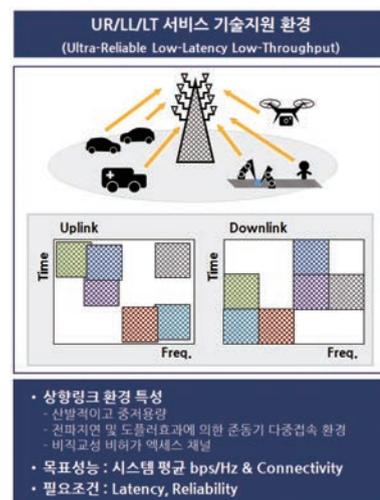
1. UR/LL/LT 서비스의 기술요구사항

초고신뢰 저지연 저용량 서비스의 기술지원 환경은 <그림 5>에 요약되어 있다. 시간 축과 주파수 축으로 통신자원을 나누어 생각할 수 있는데, 하향링크는 각 수신단에서 하향링크 동기를 획득한 상황에서 각 통신 자원이 직교하지만, 상향링크는 간헐적으로 저용량 데이터를 전송해야 하는 특성상 수신단 기준으로 송신 동기화를 수행하기 어렵다. 이에 따라 수신단에서는 전파 전달 시간에

의한 시간 동기 오차와 도플러 효과에 의한 주파수 동기 오차가 발생한다. 따라서 상향링크에서는 동기 오차에 의해 발생하는 비직교성을 효율적으로 극복하기 위한 웨이브폼 기술이 필요하다. 또한 단말에서 상향링크 웨이브폼을 구현하기 위해 고려해야 할 사항으로, 침

초고신뢰 저지연 통신의 제공을 위하여 상향링크에서는 시간 지연 없이 다수의 공간분할이나 다이버시티를 제공할 수 있는 물리계층 다중접속기술 및 신호처리 기술과 고신뢰성을 제공하기 위한 자원 할당 및 전력제어 기술을 함께 고려하는 것이 필요하다.

두 전력 대 평균 전력 비 (peak to average power ratio, PAPR)가 있다. 침두 전력 대 평균 전력 비가 높으면 단말의 전력 증폭기의 복잡도 및 전력소모가 증가하기 때



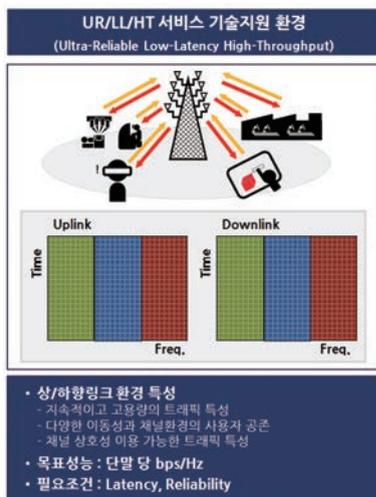
<그림 5> UR/LL/LT 서비스 기술지원 환경

문이다. LTE의 SC-FDMA (single-carrier frequency division multiple access)와 비교하여 주파수 효율이 떨어지지 않으면서도 낮은 침투 전력 대 평균 전력 비를 가지는 웨이브폼 기술이 필요하다. 또한, 다수의 단말에 대한 연결성 (connectivity)를 제공하기 위해 비직교 다중 접속방식과 이를 저복잡도로 수신하기 위하여 압축센싱 (compressive sensing)을 통한 저복잡도 동기화 및 동시 수신 방식을 활용할 수도 있다.

다중접속방식에 대해서는 초고신뢰 저지연 저용량 서비스의 산발적이고 간헐적인 상향링크 특성에 따라 트래픽 발생 시 상향링크 전송 허가 없이 전송할 수 있는 비허가 다중접속 (grant-free multiple access)을 제공해야 하며, 또한 채널 사운딩이나 피드백 지연 없이도 초고신뢰성을 제공할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 효율적으로 시간 지연 없이 다수의 공간분할이나 다이버시티를 제공할 수 있는 물리계층 다중접속기술 및 신호처리 기술과 고신뢰성을 제공하기 위한 자원할당 및 전력제어 기술을 함께 고려하는 것이 필요하다.

2 UR/LL/HT 서비스의 기술요구사항

초고신뢰 저지연 고용량 서비스의 기술 지원 환경은 <그림 6>에 요약되어 있다. 2장에서 본 바와 같이 이 서비스에 해당하는 사용 사례에서는 각 단말에서 분산 정보 처리 및 제어 또는 분산 최적화를 수행하기 위해 상호간



<그림 6> UR/LL/HT 서비스 기술지원 환경

정보를 어느 정도 대칭적으로 교환하게 된다. 또한, 이러한 정보는 지속적 발생 특성을 갖는 고용량의 영상정보를 중심으로 한다. 따라서 초고신뢰 저지연 고용량 서비스에서의 특징적인 트래픽 특성은 각 단말 별로 상향링크와 하향링크의 데이터 전송이 지속적이고 대칭적으로 이루어지게 되며, 이러한 트래픽 특성을 활용하면서도 주파수 효율을 극대화하기 위해서는 각 사용자마다 채널 환경 및 이동성에 알맞은 웨이브폼을 사용해야 하고, 각각의 서로 다른 웨이브폼들이 간섭의 영향 없이 공존할 수 있으면서도 저지연 특성을 만족할 수 있도록 웨이브폼에 사용된 필터의 지연시간을 최소화해야 한다. 또한 고용량의 트래픽을 초고신뢰 저지연 특성을 만족하면서도 효율적으로 제공하기 위해서는 이동성을 지원하면서도 사용자 별 실시간 채널에 적합하고 간섭과 페이딩을 극복할 수 있도록 시간, 주파수, 공간의 3차원 웨이브폼을 제공해야 하며, 제한된 무선 자원 내에서의 초고신뢰 특성을 만족하고 주파수 효율을 최적화하기 위해서는 3차원 웨이브폼 기술과 결합된 무선자원 할당 및 전력제어 기술이 필요하다.

IV. 향후 연구 방향

본 논문은 미래 5G의 서비스 시나리오 가운데 하나인 초고신뢰 저지연 서비스를 트래픽 특성과 서비스 기술지원 환경에 따라 2가지의 서비스 카테고리 나누어 제시하였으며, 각 카테고리 별로 서비스 사례를 분석하고 기술지원환경으로부터 기술요구사항을 도출하였고 이를 웨이브폼 및 다중접속방식 관점에서 논의하였다. 추후 보다 자세한 요구사항의 도출이 필요하며 이를 통해 웨이브폼, 다중접속 및 무선 자원관리 기술 간의 통합적인 개발이 이루어져야 한다.

노키아에서는 셀룰러 환경에서 99.999% (10^{-5})의 초고신뢰 통신 구현 가능성에 관한 연구를 진행 중이며^[8], 에릭슨에서는 공장 자동화를 위한 1ms 종단 간 지연시간 조건과 99.9999999% (10^{-9}) 초고신뢰성을 위한 배치 전략 및 컨트롤 채널 설계에 대한 연구를 진행하고 있다^[9-10]. 연세대학교에서는 서울대학교 및 고려대학교와 함께 미래부 및 IITP의 지원을 받아 사물인터넷 환경에서 촉감통



신 서비스를 제공하기 위한 초저지연 고효율 무선접속기술의 원천기술 확보를 위한 연구를 수행 중이다.

V. ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신 방송연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [B0126-15-1012, IoT환경에서 촉감통신 서비스 실현을 위한 차세대 초저지연/고효율 무선접속기술 연구]

참고 문헌

- [1] ITU-R, "IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond," Recommendation ITU-R M.2083-0, September, 2015.
- [2] 김종현, 이진녕, 이광훈, 최경준, 김광순, "Waveform and Multiple Access Techniques for Low-Latency Ultra-Reliable Communications", 제26회 통신정보 합동학술대회 논문집, 2016년 4월.
- [3] 5G-PPP, 5G-PPP White Paper on Automotive Vertical Sector, October, 2015.
- [4] NGMN, "5G Use Cases, Deployment Scenarios and Framework of Requirements," RAN 5G Workshop – The Start of Something, Phoenix, AZ, U.S.A., September 19, 2015.
- [5] 5G-PPP, 5G-PPP White Paper on Factories-of-the-Future Vertical Sector, October, 2015.
- [6] 5G-PPP, 5G-PPP White Paper on e-health Vertical Sector, October, 2015.
- [7] P. Sharma, "Augmented Reality: Its Applications and Use of Wireless Technologies", Int. J. Inf. Comput. Technol., vol. 4, no. 3, pp. 231-238, 2014.
- [8] Pocovi, G., Soret, B., Lauridsen, M., Pedersen, K. I., & Mogensen, P., "Signal Quality Outage Analysis for Ultra-Reliable Communications in Cellular Networks." Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'15), San Diego, C.A., U.S.A., DEC, 2015.
- [9] Brahmi, N., Yilmaz, O. N., Helmersson, K. W., Ashraf, S. A., & Torsner, J., "Deployment Strategies for Ultra-Reliable

and Low-Latency Communication in Factory Automation." Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'15), San Diego, C.A., U.S.A., DEC, 2015.

- [10] Ashraf, S. A., Lindqvist, F., Baldemair, R., & Lindoff, B., "Control Channel Design Trade-Offs for Ultra-Reliable and Low-Latency Communication System." Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'15), San Diego, C.A., U.S.A., DEC, 2015.



김종현

- 2016년 2월 연세대학교 전기전자공학과 학사
- 2016년 3월 연세대학교 전기전자공학과 통합과정
- 2013년 8월~2014년 3월
퀵컴씨디엠에이테크놀로지코리아 모뎀SW

<관심분야>
웨이브폼, 다중접속방식



김광순

- 1994년 2월 한국과학기술원 학사
- 1996년 2월 한국과학기술원 석사
- 1999년 2월 한국과학기술원 박사
- 1999년 3월~2000년 3월 Dept. ECE, UC San Diego, 박사후연구원
- 2000년 4월~2004년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2004년 3월~2009년 2월 연세대학교 전기전자공학과 조교수
- 2009년 3월~2015년 2월 연세대학교 전기전자공학과 부교수
- 2015년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수

<관심분야>
통신이론, 변복조 방식, 다중접속 방식, 다중사용자/다중셀 다중 안테나 시스템, 이중 셀룰러 네트워크 최적화