5G 저지연 서비스 및 테스트베드 개발 동향

황유선, 배명산, 신재욱
한국전자통신연구원

요 약

5세대(5G) 이동통신은 다양한 모바일 기기와 가입자의 확산에 따른 모바일 트래픽 증가를 수용할 뿐만 아니라 원격의료와 같이 저지연을 기반으로 하는 새로운 형태의 서비스를 제공함을 목표로 한다. 저지연 서비스는 수 밀리세컨드 (ms) 이내의 단대단 지연 요구사항을 가지며 무선 구간에서의 전송지연도 기존 시스템 대비 획기적인 단축을 필요로 한다. 본고에서는 5G 저지연 서비스의 개념 및 요구사항, 그리고 저지연 무선 기술 및 테스트베드 개발 동향에 대해서 알아본다.

Ⅰ. 서 론

1980년대 초에 아날로그 방식의 1세대 이동통신이 음성 서비스를 시작한 이래, 디지털 방식을 채용한 2세대 이동통신(2G), 데이터 서비스가 강화된 3세대 이동통신(3G)을 거쳐 현재는 고속 모바일 인터넷 서비스가 가능한 4세대 이동통신(4G) 서비스가 제공되고 있다[1]. 한편, 2007년도의 스마트폰 출현은 모바일 서비스를 사용자 친화적으로 변화시키고 모바일 트래픽을 폭발적으로 증가시켰으며, 매년 2배씩 증가할 것으로 예측되는 모바일 트래픽을 수용하기 위해서는 5세대(5G) 이동통신이라는 새로운 기술 개발의 필요성으로 이어지게 되었다.

향후 이동통신 환경에서는 스마트폰, 웨어러블(wearable) 디바이스 등을 포함한 다양한 휴대기기의 보급과 고화질 비디오 기반의 다양한 동영상 서비스가 지속적으로 증가하며, 사물 기기 간의 통신인 M2M(Machine to Machine)이나 사물 인터넷(IoT: Internet of Thing)의 본격적인 확장으로 사람이 관여하지 않는 사물 기기의 수도 급증할 것으로 예상된다. 또한, 시각(비디오), 청각(오디오) 기반의 서비스와 더불어 실감형 콘텐츠 기반 서비스와 자율 주행과 같은 실시간 상호작용 및 정밀 원격제어가 가능한 저지연 서비스가 활성화될 것으로 예상되고 있다.

흔히 촉감 인터넷(Tactile Internet)으로 대표되는 저지연 서비스는 수 밀리세컨드(ms: 1초의 1000분의1) 이내의 단대단 지연(End-to-End Latency)을 요구하고 있으며, 이와 같은 요구사항이 5G 이동통신에서 만족될 경우 증강 현실(Augmented Reality)이나 가상 현실(Virtual Reality)과 같은 실시간 상호작용 멀티미디어 서비스가 사용자에게 보다 자연스럽게 제공될 것이다.

기존 이동통신의 경우 무선구간 전송 지연시간이 수십 ms 수준에서 제공되고 있어서 이를 감소시키기 위한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다. 5G 이동통신 비전 및 기술 요구사항을 정의하고 있는 국제표준화 기구인 국제 전기통신 연합(ITU: International Telecommunication Union)과 대표적인 5G 기술연구 프로젝트인 유럽 METIS(Mobile and wireless communication Enabler for The 2020 Information Society)에서 이미 저지연을 5G 이동통신 핵심 성능 지표(Key Performance Indicator)의 하나로 지정하고 있다. 저지연 기술은 5G 이동통신의 핵심 기술 요소 중에 하나로 자리매김하고 있다[19].

본 논문의 2장에서는 5G 저지연 서비스의 개념 및 성능 지표를 알아보고, 3장에서는 저지연 서비스의 종류 및 서비스별 지연 요구사항에 대해서 기술한다. 4장에서는 5G 저지연 기술 테스트베드 개발 동향에 대해서 살펴보고, 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 5G 저지연 서비스의 개념

정보가 미디어를 통해서 사람이 받아들일 때 지연시간이 발생하게 된다. 사람이 미디어를 통해 지연되어 전달된 정보에서 불편함을 느끼지 않으려면 터치는 1초, 청각 정보는 약 100 ㎳ 이내에 전달되어야 하며, 시각 정보는 약 10 ㎳의 허용 지연시간 이내에 전달되어야 한다[11]. 특히, 사람의 오감 중 촉감은 손가락에서 머리까지1ms 지연시간 안에 전달되어야 어색함이나 불편함을 느끼지 않는다〈그림 1〉. 따라서, 지연시간에 가장 민감한 촉감 정보를 무선통신 시스템을 통하여 제공한다고 가정할

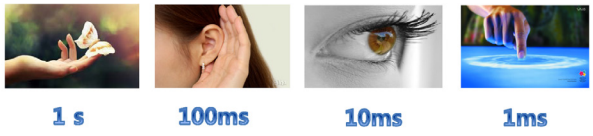

그림 1. 사람의 감각별 지연 시간[2]

때, 사용자가 신경을 통해 전기신호가 전달되는 것과 같이 어색함을 느끼지 않도록 하기 위해서는 허용 지연시간을 1 ms 이내로 설정하는 것이 5G 이동통신 시스템에서 필요하다.

5G 이동통신의 핵심적인 기능으로 주목을 받고 있는 저지연 기술은 촉감 정보가 전달될 만큼의 무선통신 서비스를 제공해 줄 수 있는 인터넷을 말하며 이를 촉감 인터넷이라고 불리고 있다[1].

촉감 인터넷과 더불어 미래에는 증강/가상 현실, 실시간 온라인 게임 등과 같은 다양한 실시간 상호작용 멀티미디어 서비스가 증가할 것이다. 이러한 서비스를 사용하는 사용자들이 자연스러운 상호작용을 경험하기 위해서는 저지연 무선통신 서비스의 제공이 필요하다[3][4].

교통, 스포츠, 교육, 의료, 제조 등과 같은 다양한 응용 영역에서 무선통신 지연시간이 수 ms 이내의 단대단 지연 (end-to-end latency)을 요구하는 새로운 무선통신 서비스들이 창출될 것이다. 예를 들어, 차량 간 통신 (V2V: vehicular-to-vehicular communications) 및 차와 인프라간의 통신 (V2I: vehicular-to-infrastructure communications)은 교통안전 서비스 제공을 위하여 극단적으로 짧은 무선통신 지연을 필요로 한다. 또한, 긴급한 상황에서 로봇 등을 통한 원격 수술은 교통안전 서비스와 마찬가지로 높은 신뢰성 및 안정성을 보장하고 매우 짧은 지연을 보장할 수 있는 무선통신 기술의 제공이 요구된다.

〈그림 2〉에서 보듯이 저지연 서비스들은 대부분 저지연, 고신뢰성 무선전송을 필요로 하며, 이 서비스들을 사용자에게 원활히 지원하기 위해서는 데이터 패킷의 단대단 지연이 수 ms 이하를 요구하고 있다. 산업 자동화, 드론 제어와 같은 원격 제어 및 차량 군집 주행 등과 같은 서비스는 지연 시간이 10ms이내, 신뢰성은 99.999%의 요구사항을 만족해야 한다.

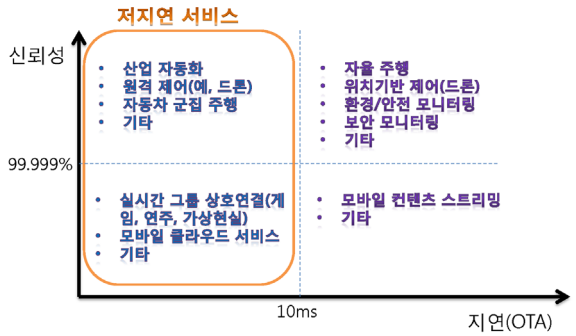

그림 2. 신뢰성과 저지연을 고려한 서비스 종류[9]

현재 LTE(Long Term Evolution) 시스템에서의 데이터 패킷의 단대단 지연은 20ms 정도로 위의 서비스들을 원활히 지원하는데 한계가 있다. 5G 이동통신은 이러한 서비스 반응 시점까지의 지연 시간을 수 ms이내로 단축하는 것을 목표로 하고 있으며, 저지연성 확보를 위한 연구를 많은 기업과 연구소가 진행하고 있다.

ITU-R에서 우리가 4세대라고 부르는 4G를 IMT-Advanced라고 정의하면서 핵심 성능지표를 정의하였고, 올해 6월에 WP(Working Party) 5D에서 5G를 IMT-2020으로 정의하고 2020년까지 시장 동향에 맞는 무선 데이터 트래픽을 지원할 수 있는 통신기술을 위한 8개 핵심 성능(Key Capability) 지표를 제시하고 있다. 여기서 제시한 핵심 성능 지표 중 전송 지연(Latency)은 가장 중요한 지표 중의 하나이다. IMT-Advanced에서의 전송 지연 10ms와 비교하여 IMT-2020에의 전송 지연 1ms으로 지연을 단축하는 것을 목표로 하고 있다[5].

ITU-R에서는 무선통신 전송지연을 사용자 평면 지연과 제어 평면 지연으로 나누어 정의하고 있다. 사용자 평면 지연은 단말에서 기지국까지 또는 기지국에서 단말까지 패킷이 IP계층간에 단방향으로 전송되는데 소요되는 시간을 의미하며, 제어 평면 지연은 단말이 유휴(idle) 상태에서 연결(connected) 상태로 전환하는데 소요되는 시간을 의미한다[21].

METIS는 유럽의 대표적인 FP7[1](7th Framework Programme) 프로젝트로서 주요 요구사항으로 현재 시스템과 비교해서 단위 면적당 1000배 데이터 용량과, 10~100배 빠른 데이터 속도와, 10~100배 증가된 디바이스, 10배 길어진 배터리 소모량을 목표로 하며, 5배의 단대단 저지연을 목표로 하고 있다. 이러한 목표를 위해서 5개의 시나리오를 정하고 12개의 서비스로 〈그림 3〉과 같이 정의하였다.

시나리오는 빠른 속도(Amazingly fast), 밀집 지역에서 서비스 (Great Service in a crowd), 사용자 중심 이동성(Best experience follows you), 초실시간과 고신뢰성 연결(Super real-time and reliable connections), 사물 통신 (Ubiquitous things communication) 이고, 저지연 관련 시나리오는 초실시간과 고신뢰성 연결이다.

12개의 서비스(Test Case 1~12)는 다음과 같다. TC1은 가상현실 사무실에 대한 서비스, TC2는 밀집된 도시형 사회, TC3은 쇼핑몰, TC4는 운동 경기장, TC5는 스마트 그리드, TC6

1 범 유럽 R&D 프로젝트(2007~2013)이며, 이후 Horizon-2020으로 이어지고 있다

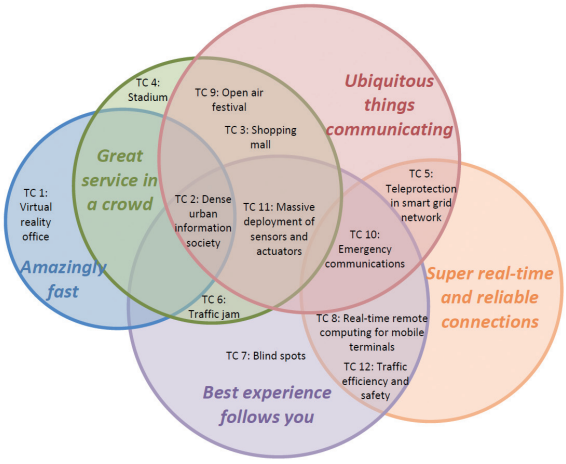

그림 3. METIS에서의 서비스 시나리오 분류

는 교통 혼잡 상황, TC7은 셀내 음영지역, TC8은 모바일 원격 컴퓨팅, TC9는 광장의 페스티벌 상황, TC10은 긴급재난 통신, TC11은 사물 통신, TC12는 차량 안전 및 자율 주행을 위한 차량간 통신에 대한 서비스를 들고 있다[6].

이후 실시간 게임, 마라톤, 사용자 요구 미디어, 무인 항공기, 원격 촉각 통신, 원격 진료, 저가용 네트워크, 원격 차량 제어, 원격 산림 제어에 대한 9개의 서비스를 추가했다. 이러한 시나리오에서 가상 현실 오피스, 스마트 그리드, 모바일 원격컴퓨팅, 긴급재난 통신, 차량 안전 및 자율 주행 서비스는 저지연을 위한 것으로, 이 중에서 차량 안전 및 자율 주행을 위한 차량간 통신 서비스에 대한 지표 중 신뢰성은 99.999% 이상, 전송 지연은 5ms 이하로 최대치를 정의하고 있다[7]. METIS도 ITU과 마찬가지로 저지연 서비스가 5G 이동통신의 핵심지표라 정의하고 있다.

Ⅲ. 5G 저지연 서비스 지연 요구사항

5G 이동통신에서 제공하려는 저지연 서비스는 초저지연 시간이 요구되는 실시간 실감형 온라인 게임, 건강 관리(원격 의료), 산업 자동화, 가상/증강 현실, 무인 자동차, 로봇시스템과 드론 제어와 같은 원격 제어 등이 있다[2]. 〈그림 4〉에서 5G 저지연 서비스 사례를 나타내고 각 서비스에 대한 응용 및 요구사항을 아래에 설명한다.

1. 건강 관리(Healthcare)

현재도 건강 관리를 위한 시스템은 많이 보급되고 있다. 예를 들면 애플 와치나, 삼성 기어 등으로 센서가 정보를 수집하고,

그림 4. 5G 저지연 서비스 예

스마트폰으로 정보나 알림을 보내거나, 통계 정보를 전달하는 어플리케이션 형태로 발전된 건강관리 서비스가 있다. 그리고 의료 서비스로 산간 오지와 같은 지역 주민들에게 원격 화상 진료 서비스나, 모바일 케어 서비스도 진행되고 있다.

건강 관리에서 저지연 서비스는 환자와 의사의 간격을 더욱 좁혀, 의사가 환자의 체온이나, 음성, 심장 박동 등의 정보를 더욱 정확한 진료에 도움을 받을 수 있으며, 단대단 지연시간 2-5ms 요구사항을 만족하면 외과 진료 및 치료에서 정밀한 외과적 검진 및 수술을 원격으로 시행할 수 있는 서비스가 가능해질 것이다. 특히 의사가 직접 찾아가기 힘든 지역에서 환자 발생 시 로봇을 통해 치료하는 원격 의료 서비스나 체력이 떨어진 환자를 위한 로봇 보조기나, 인공 관절과 같은 의료 산업에서도 저지연은 필수적인 요소라고 할 수 있다.

2. 차량간 통신 및 자율 주행 (Traffic Safety and Autonomous driving)

현대인들에게 차는 없어서는 안 되는 요소가 되었다. 그러나 운전자가 주행을 시작하는 순간부터 불편함을 느끼기 시작한다. 주위의 수많은 차, 건물, 도로 상황, 신호 체계를 살피며, 사람들의 안전을 위해 오감을 열어놓는다. 운전중인 사용자의 오감을 지원하거나 인식하지 못해서 발생하는 교통 사고들을 줄이기 위한 많은 노력이 있다. 가장 대표적인 서비스가 센서를 이용한 차량간 통신이고 이를 지원하기 위해서 무선전송구간에서 5ms이하의 지연시간을 요구한다. 그리고 운전자 개입 없이 센서 정보만으로 주행할 수 있는 자율 주행 및 무인 자동차 서비스는 단대단 지연시간 1ms 이하 요구사항을 만족해야 한다. 저지연 서비스는 효과적인 요소가 될 수 있다. 교통량 및 신호체계 등을 실시간으로 대응할 수 있으며, 자율 주행에서 위기상황에 빠르게 대처할 수 있고, 에너지 효율에서 효과적인 요소

가 될 수 있다.

3. 가상 현실(Virtual Reality)

최근 실시간 게임은 단순한 그림에서 벗어나, 영화와 같은 크기와 성능으로 제작되고 있다. 단순한 디스플레이를 넘어 가상현실을 구현할 수 있는 요소가 개발되고 있다. 삼성은 기어 VR 제품으로 HMD(Header Mount Display)업계에 투자하였고, 페이스 북에 인수된 오큘러스 리프트 (www.oculus.com)는 Microsoft(X-box)와 제휴하여 가상 현실에서 활용 가능한 게임용 입력 도구(오큘러스 터치) 등도 개발하고 있다.

단대단 지연시간 2-5ms를 만족하는 가상현실 서비스는 게임 도구를 이용한 실시간 게임에서 중요한 요소가 되고 있다. 특히, 실시간 게임 사용자가 미디어를 통해 실시간 상호작용 서비스를 제공받기 위해 지연으로 인한 불편함을 최소화 할 수 있다.

4. 증강 현실 (Augmented Reality)

반도체의 발달로 카메라와 센서는 웨어러블 디바이스 형태로 발전되고 있다. 대표적으로 구글 글래스를 들 수 있으며, 응용분야로는 관광 혹은 박물관/미술관 도우미 서비스를 제공할 수 있으며, 차량 운전자나 경찰이나 소방관들에게 도움을 줄 수 있는 서비스로 대표될 수 있다.

현재 HMD나 구글 글래스를 이용하여, 피로감 없는 증강 현실을 구현하기 위해서 저지연은 중요한 요소라고 할 수 있다. 현재의 스마트폰 기반의 모바일 증강 현실 시스템에서는 고화질 카메라, 위치정보, 각도 등의 센서를 통해 얻어진 정보를 기반으로 가공된 다양한 정보를 증강된 인터페이스의 형태로 제공하는 것에 초점을 맞추고 있다. 향후 사용자는 단대단 지연시간 2-5ms을 만족하는 '모바일 인식 및 증강' 서비스로 증강 현실을 경험할 것이며, 이 서비스는 다양한 센싱 정보, 상황 인지, 지능화된 네트워크 정보 자원들과 융합될 것이다. 5G 기술을 통한 모바일 인식 및 증강 기술은 수술 로봇을 이용한 인간의 수술에 적용할 수 있으며, 다양한 센서들을 통해 수집한 정보를 체계적으로 처리를 하고 가치 있는 정보로 변환하여 수술 로봇에게 실시간으로 전송함으로써 고도의 정밀도와 초실시간적 응답을 요구하는 운영 환경에서 유용하게 활용될 것이다.

5. 원격 제어 (Remote Control)

5G에서는 네트워크의 단대단 지연 시간이 수 ms로 줄어들게 되면서 단방향으로 정보를 제공하는 수준에 머무른 4G의 데이터 기반 서비스를 넘어 사용자가 생각하는 순간 반응하는 양방향 초실시간 서비스가 실현될 것으로 예상된다. 예를 들어, 위험한 공사 현장에 사람 대신 투입된 로봇을 안전한 장소에서 원격으로 조정하면서도 로봇이 처한 외부 환경 변화에 즉각적으로 반응할 수 있는 원격 로봇 제어 서비스 등의 여러 실시간 원격 제어 서비스가 활성화될 것으로 예상된다. 또한, 고신뢰성과 초실시간이 동시에 요구되는 공장에서의 초정밀 자동화 시스템 및 센서, 동력 전달 장치, 조향 장치, 브레이크 장치 간의 연동이 필요한 자동 주행 차량 등 기기 간 통신서비스 역시 크게 부각될 것이다.

6. 몰입형 통신 서비스(Immerse communication)

현재 4G에서는 고화질 HD 영상 전화 및 고음질의 VoLTE(Vocie of LTE) 서비스가 널리 사용되고 있다. 그러나 사람들이 직접 만나서 이야기하는 것과 비교해 볼 때 여전히 영상 전화 및 VoLTE 서비스는 사용자 경험 측면에서 다소 부족하다. 향후 5G에서는 상대방이 자신 바로 옆에 있는 것 같은 몰입형 통신 경험을 사용자에게 제공하기 위해 인간의 오감 중 특히 시각적인 관점에서 큰 폭의 발전이 예상된다.

초고용량 통신이 가능한 5G 네트워크에서는 무선전송구간 지연시간이 1ms를 만족하며 FullHD 해상도의 4배에 해당하는 4K-UHD, 16배에 해당하는 8K-UHD 등의 초고용량 영상 콘텐츠가 보편화될 것으로 예상되며 장기적으로는 3D 영상 또는 홀로그램 서비스로 확대될 전망이다. 또한 이러한 화질의 향상과 더불어 실감형 미디어 형태의 오감을 지원하는 양방향 맞춤형 콘텐츠가 발전될 것이다[18].

7. 추가적인 응용 영역

저지연이 필요한 서비스는 많이 존재한다. 특히 역동적인 스포츠 경기장에서 선수와 같이 느낄 수 있는 서비스, 수 많은 카메라 중에서 실시간으로 원하는 장면만을 선택해서 볼 수 있는 서비스가 될 수도 있으며, 로봇간 통신 등도 저지연이 필수적인 요소라고 할 수 있다.

Ⅳ. 저지연 기술 테스트베드 개발 동향

5G 저지연 기술에 대한 연구는 용량증대 기술보다는 상대적으로 덜 이루어진 편이다. 현재까지 발표된 5G 저지연 무선기술에 대한 국내외 연구 및 테스트베드 개발 동향은 다음과 같다.

1. 에릭슨(Ericsson)

15GHz 주파수(cmWave)대역에서 4개의 100MHz 캐리어를 사용하여 전송속도 5.3Gbps를 제공하는 5G 테스트베드를 MWC2015(Mobile World Congress)에서 선보였다. 이와 더불

그림 5. 에릭슨의 굴삭기 원격 운전 시연

어 LTE 통신기반으로 스웨덴에 있는 굴삭기를 실시간 영상과 더불어 원격 운전할 수 있는 저지연 기술 테스트베드를 구축하고 시연하였다[23].

2. SK텔레콤

MWC2015에서 28GHz 대역에서 800MHz대역폭으로 최대 7.55bps 전송성능을 제공하는 밀리미터 웨이브 테스트베드를 삼성과 협업으로 선보였다. 또한, 사람의 움직임에 따라 로봇의 동작이 실시간으로 동기화되고 제어되는 저지연 기반 서비스를 시연하였다[8].

그림 6. SK텔레콤의 실시간 로봇 제어 시연

3. 5GLab

독일TU 드레스덴 (Technische Universität Dresden)의 5GLab에서는 저지연으로 전송되는 HMD 영상을 보면서 공 받는 동작을 수행하는 서비스를 선보였다. 저지연 기술이 적용되지 않은 상태로 영상이 전달될 경우는 공을 잡을 수 없음을 비교 시연해 보였다[15].

그림 7. 5GLab 저지연 서비스 시연

4. LOLA 프로젝트

2013년에 종료된 유럽연합 프로젝트인 LOLA (LOw-LAtency in Wireless Communications) 에서는 지연성능 개선을 목표로 하였으며, 저지연 서비스를 제공하기 위한 M2M 통신모델과 셀룰러 네트워크에서의 저지연 전송을 위한 실시간 트래픽 분석 연구를 진행하였다[13].

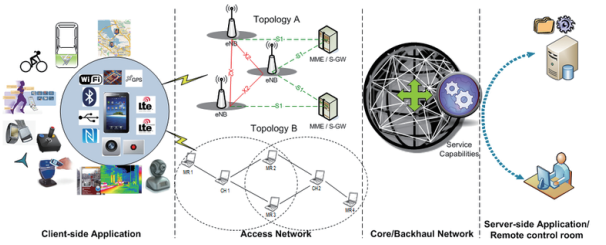

그림 8. LOLA 시스템 구조

5. 노키아 (Nokia)

노키아는 5G 무선전송 기술로서 15GHz 대역에서 200MHz 대역폭으로 4x4 MIMO(Multiple-Input and Multiple-Output)와 256QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 기술을 사용하는 5G 무선 프레임 구조를 아래 그림과 같이 제안하였다. 제안한 5G 프레임 구조에서는 데이터 부분보다 제어 부분을 앞에 위치시켜 수신단에서의 파이프라인 처리(pipeline-processing: 단말이 데이터를 받고 전달하는 동안 단말 전용 제어정보를 동시에 처리함)을 지원하여 낮은 계산 복잡도를 가지고 지연시간을 줄이는 장점이 있다[17].

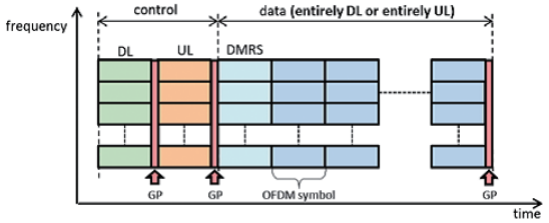

그림 9. 노키아의 5G 무선 프레임 구조

6. METIS 프로젝트

알토 대학에서는 TD-LTE 기반으로 D2D(Device-to-Device), 사물 통신과 같은 서비스 중심의 테스트베드

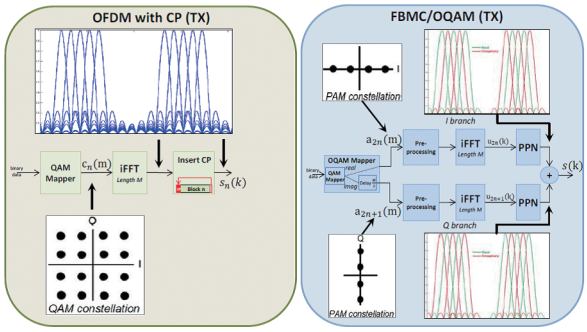

그림 10. METIS 5G 웨이브폼 기술

를 진행하였으며, 브르타주 텔레콤에서는 새로운 웨이브폼(Waveform) 검증을 위한 테스트베드 개발을 진행하였다. FBMC/OQAM (FBMC: Filter Bank Multicarrier/OQAM: Offset Quadrature Amplitude Modulation) 기술 기반의 5G 웨이브폼 테스트베드는 기존 LTE 대비 지연시간을 25% 감소한다고 발표하였다. 이와 함께 METIS에서는 고신뢰성 통신을 위한 지연 성능 요구사항을 정의하고 다양한 저지연 서비스 예를 제시하였다[22].

7. 한국전자통신연구원(ETRI)

한국전자통신연구원에서는 5G 핵심기술개발 과제의 핵심 연구항목의 하나로서 저지연 무선전송 기술을 연구하고 있으며 이를 검증하기 위한 테스트베드 개발을 진행하고 있다. 무선 구간에서 데이터 전송 지연을 감소시키고 ITU-R에서의 단방향1ms 전송지연 요구사항을 만족시키기 위해서 Short TTI (Transmission Time Interval) 기반의 무선전송 및 제어기술을 개발하고 있다.

8. 5GNOW 프로젝트

5GNOW에서는 비동기 무선접속 기술의 하나로, OFDM에 비해 높은 주파수 사용 효율을 가지는FBMC전송기술에 대한 테스트베드 개발을 진행하였으며, 초저지연에 기반한 촉감 인터넷이라는 개념을 발굴하였다[14].

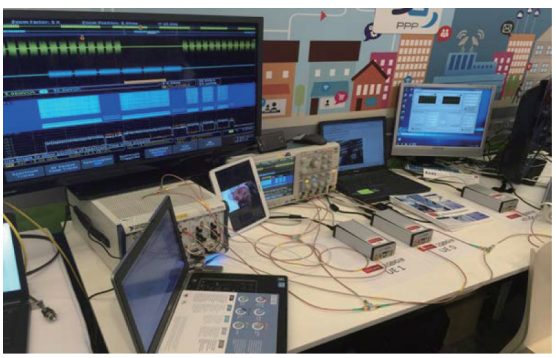

그림 11. 5GNOW의 5G무선기술 테스트베드

V. 결 론

본 고에서는 5G 이동통신의 핵심 서비스로 대두되고 있는 저지연 서비스에 대한 개념과 요구사항, 그리고 5G 저지연 무선전송 기술과 테스트베드에 대한 국 · 내외 연구동향을 살펴보았다. 5G 이동통신에서는 고속 · 대용량 뿐 만 아니라 저지연 · 고신뢰성 기반의 사용자 서비스를 지원할 수 있도록 무선 액세스 기술이 개발되어야 하며, 촉감 인터넷과 같은 단대단 초저지연 서비스를 실현하기 위해서 무선 액세스 네트워크뿐 만 아니라 코어네트워크까지 포함하는 유무선 네트워크 전체에 대한 저지연 전달 구조가 고려되어야 한다. 2020년 상용화가 예정된5G 이동통신에서는 초다수 기기간의 사물 인터넷 서비스와 더불어 실감 상호작용 기반의 원격 의료와 같은 초저지연 서비스가 5G를 대표하는 새로운 서비스로 제공될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] 한국방송통신전파진흥원, “5세대 이동통신의 새로운 이슈, Tactile Internet의 소개,” 방송통신기술 이슈&전망, Korea Communications Agency, no. 49, Feb. 2014.
[2] ITU-T, The Tactile Internet, ITU-T Technology Watch Report, Aug. 2014.
[3] G. Fettweis and S. Alamouti, “5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony,” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 140-145, Feb. 2014.
[4] G. Fettweis, “The Tactile Internet - Applications and Challenges,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 64-70, Mar. 2014.
[5] 김경미, “제21차 ITU-R WP 5D 회의,”TTA Journal.
[6] METIS, D1.1 Scenarios: Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System, Apr. 2013.
[7] METIS, D1.5 Updated scenarios: Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System with recommendations for future investigations, Apr. 2015.
[8] SK텔레콤, 5G 시대 선도하는 네트워크 기술 시연 http://

kr.aving.net/news/view.php?articleId=1245172
[9] 변일무, 5G 저지연 서비스 요구 조건과 기술 연구 동향, 미래통신기술워크샵, 2015.
[10] NOKIA, 5G Use Cases and Requirements.
[11] NTT DOCOMO, 5G Radio Access: Requirements, Concepts and Technologies.
[12] ARIB 2020 & Beyond Ad Hoc Group, Mobile Communications Systems for 2020 and beyond.
[13] http://www.ict-lola.eu/
[14]Gerhard Wunder, Peter Jung, and Martin Kasparick, "5GNOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications,"IEEE Communications Magazine, Feb. 2014.
[15] 5GLab, http://5glab.de/demos/
[16]Radio Access를 중심으로 본 NTT Docomo의 5G, http://www.netmanias.com/ko/?m=view&id=blog&no=7171
[17]Preben Mogensen, et al., "5G small cell optimized radio design," IEEE Globecom, 2013.
[18]방승찬, "5G 통신기술," 정보와통신, vol.32, no.5, pp.73-86, May, 2015.
[19]최새솔, 송영근, 김항석, "5G 이동통신 저지연 기술 기반 서비스 시나리오 및 이슈분석," 한국콘텐츠학회 종합학술대회, 2015.
[20] Vodafone, S1-144361: Overview of potential 5G study item, 3GPP TSG-SA WG1, Nov. 2014.
[21] ITU-R, R-REP-M.2134-2008-MSW-E: Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s), 2008.
[22] METIS, D1.3 Test-bed/demonstration results, Apr. 2015.
[23] Ericsson first with key 5G advances http://www.ericsson.com/news/1897060

약 력

황 유 선

1999년 한양대학교 학사
2001년 한양대학교 석사
2001년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
관심분야: 5G 이동통신, D2D

배 명 산

1996년 충남대학교 학사
2013년 MTH 수석연구원
2013년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
관심분야: 5G 이동통신, D2D

신 재 욱

1992년 경북대학교 학사
1994년 경북대학교 석사
2001년 충남대학교 박사
1994년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원
관심분야: 5G 이동통신, D2D, M2M