

차세대 초저지연/고효율 이동통신 기술 연구 동향

최경준, 이진녕, 김종현, 김광순
연세대학교

요약

본고에서는 최근 화두로 떠오르고 있는 다양한 사물인터넷 서비스를 제공하기 위한 차세대 이동통신에서의 사물통신 요구조건을 알아보고, 이를 제공하기 위한 새로운 기술에 대한 연구 동향을 정리하고 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

I. 서론

사물 인터넷 (Internet of Things, IoT)은 가전제품, 자동차, 웨어러블 장비, 각종 센서 등의 사물에 통신 기능을 내장하여, 인간과 사물 및 사물간 연결을 제공하는 것이며[1], 더 나아가 구성 요소 간 센싱 및 정보 교환과 정보 처리 및 제어가 가능하며 궁극적으로 인위적인 개입 없이 지능적 관계를 형성할 수 있는 환경을 의미한다[2]. 이러한 사물 인터넷의 발달은 정보통신 기술이 사용자의 삶 속에 깊숙이 들어와 정보를 습득하고 이용할 수 있도록 만들어 주는 초연결사회를 실현하는데 필수적이며[3], 이를 위한 사물인터넷 서비스는 가전, 헬스케어, 홈케어, 자동차, 교통, 건설, 농업, 환경, 엔터테인먼트, 에너지, 식품 등 다양한 환경으로 확대되어 미래 서비스를 제공하기 위한 필수적인 환경을 구축할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

이러한 사물인터넷 서비스를 위한 사물간 통신 (machine-type communication, MTC)을 여러 가지 측면에서 분류할 수 있지만, 특히 연결성과 통신 요구 조건에 따라 분류한다면 크게는 Massive MTC와 Critical MTC로 분류할 수 있다[4]. 여기서, Massive MTC는 요구 데이터 용량이 작고 어느 정도의 지연(latency)이 허용되지만 매우 많은 수의 사물을 동시에 연결해야 하며, 각각의 사물이 통신에 소모할 수 있는 전력이 매우 제한적인 사물간 통신을 뜻하며, 예를 들어 스마트 미터, 위치 기반 수화물, 지능형 가로등 등의 센서 네트워크가 이러한 Massive MTC를 필요로 하는 대표적인 예에 속한다. 이에 비해 Critical MTC는 Massive MTC와 달리 매우 높은 신뢰성

(ultra-high reliability)과 초저지연 (ultra-low latency) 특성을 요구하는 사물간 통신을 뜻하며 예를 들어 촉각 통신(tactile internet), 공장 자동화, 로봇 네트워크 등 센싱된 정보를 처리해 사물을 정확하고 빠르게 제어해야 하는 서비스들이 Critical MTC를 필요로 하는 대표적인 예에 속한다.

5세대 이동통신(5G)으로 대표되는 IMT-2020에서는 Massive MTC의 경우 LTE-A에 비해 최대 기기 연결수에서 10배, 에너지 효율성에서 100배를 목표로 하고 있으며, critical MTC를 위해서는 전송 지연은 10~100배 낮은 1ms 이내를 목표로 하고 있으며[4], 공식 KPI(key performance indicator)는 아니지만 99.999%의 신뢰도 수준(또는 10^{-9} 수준의 패킷 손실 확률)을 목표로 하고 있다[5]. 또한, 사물통신에 인공지능이 적용되어 실시간 영상정보를 처리하여 빠른 이동속도를 가지는 로봇을 제어하는 경우를 생각하면 저지연, 고신뢰성과 더불어 적어도 LTE-A수준의 주파수 고효율성을 제공해야 한다. 하지만, 이는 현재 수준의 기술로는 불가능하며, 이를 위해 네트워크 구조에서부터 물리계층 신호 웨이브폼과 다중접속방식에 이르기까지 혁신적인 새로운 기술을 개발해야 하는 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 최근에 연구 중인 IoT를 위한 차세대 이동통신 기술 개발 동향에 대해 정리하고, 앞으로의 연구 방향에 대하여 제시한다.

II. 사물인터넷 서비스를 위한 차세대 이동통신 시스템 요구조건

미래의 5G에서는 높은 주파수 효율, 초저지연, 그리고 매우 많은 수의 사물들이 연결되는 특성을 기반으로 다양한 사물인터넷 서비스가 등장할 것으로 예측되며 이러한 사물인터넷 서비스의 특징과 대표적인 서비스들의 예를 <그림 1>에 나타내었다[6]. 예를 들어 가상 현실(Virtual Reality)의 경우 가상 서버(VR server)와 사용자 간에 높은 정확도와 매우 짧은 지연의 상호 작용을 제공할 수 있어야 하며 고용량의 영상 기반의 정보를 전달

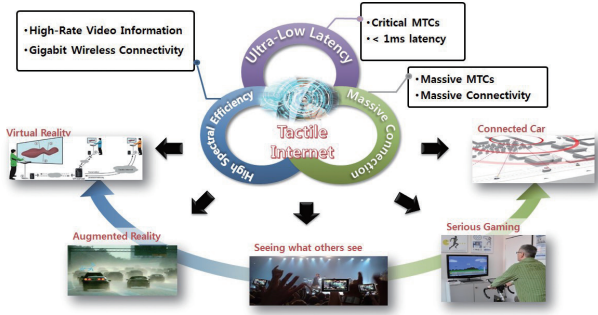


그림 1. 다양한 사물인터넷 서비스

할 수 있어야 한다. 또 다른 예로 자동차 간의 자동 연계주행을 제공하기 위해서는 초연결성과 함께 높은 정확도로 1ms 이내에 정보를 전달할 수 있어야 한다. 이러한 사물통신 서비스를 제공하기 위한 사물간 통신도 매우 다양한 요구 조건을 가지게 되며 이 요구조건을 만족하기 위한 네트워크 구조 및 무선통신 특성에서 다양한 형태를 가지게 된다. 먼저 하나의 예로 많은 수의 사물을 동시에 연결하는 Massive MTC를 필요로 하는 서비스를 위한 네트워크 구조 및 무선 접속의 특징의 일례를 <그림 2>에 나타내었다 [7]. 다수의 이기종 셀룰러 네트워크 (heterogeneous cellular network) 기지국과 중앙 클라우드 서버 (central cloud server)를 연결하는 코어 네트워크와 매우 많은 수의 massive MTC 단말들이 존재한다. 각 단말들은 초저전력이며 간헐적 접속(sporadic access) 또는 긴 주기의 주기적 접속(periodic access) 특성을 가지며, 기지국은 매우 많은 massive MTC 단말들과 동시에 연결할 수 있는 초연결성을 제공한다. 무선 자원의 효율적 사용과 단말의 전력소모 감소를 위해 기지국과 단말 사이의 무선 접속은 준직교/비동기 기반 다중접속이며, 코어 네트워크는 Massive MTC의 서비스품질을 제공하고 중앙 서버는 넓은 영역에서 사물통신 서비스를 제공한다.

또 다른 예의 하나로 적당한 수의 사물을 대상으로 매우 높은 신뢰성과 초저지연 특성을 제공하는 Critical MTC를 필요로 하는 서비스를 위한 네트워크 구조 및 무선 접속의 특징의 일례도 <그림 2>에 나타내었다. 같은 형태의 다수의 이기종 셀룰러 기지국과 코어 네트워크에서 중앙 서버와 더불어 다수의 분산 클라우드 서버 (edge cloud server)가 네트워크 내에서 각각의 영역을 담당한다. 각각의 critical MTC 단말들은 간헐적 접속 또는 보다 짧은 주기의 주기적 접속 특성을 가지며, 전달되는 정보는 짧은 길이의 센싱/제어 정보에서부터 고용량의 영상센싱/영상처리 정보를 포함한다. 비교적 좁은 영역에서 중단간 저지연을 필요로 하는 서비스 특성상 분산 서버를 통해 서비스를 처리하며 기지국과 단말 사이의 무선 접속은 초저지연을 제공할

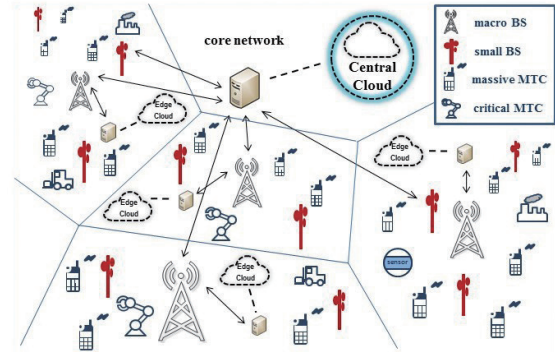


그림 2. Massive & Critical MTC

수 있는 웨이브폼을 이용한 다중접속이며, 고신뢰성과 고효율성을 제공할 수 있어야 한다.

위에서 본 것과 같이 다양한 사물인터넷 서비스를 제공하기 위해서는 차세대 이동통신 시스템을 구성하는 클라우드 서버, 코어 네트워크, 기지국, 단말 및 무선 접속 기술에서 이제까지의 이동통신 시스템에 비해 훨씬 넓은 범위의 역할과 서비스 요구사항을 지원해야 하며, 이를 위해서는 네트워크 구조에서부터 물리계층 신호 웨이브폼과 다중접속 기술에 이르기까지 혁신적인 새로운 기술을 개발해야 한다. 이를 위한 다양한 연구 동향을 다음 절에 소개한다.

Ⅲ. 차세대 이동통신기술 연구동향

이 절에서는 차세대 이동통신 기술 연구동향을 네트워크 기술, 무선 다중접속 기술, 고효율/고신뢰 통신기술, 무선 웨이브폼 기술로 나누어 소개한다.

1. 네트워크 기술

앞서 설명한 것과 같이 차세대 이동통신 네트워크는 다양한 Massive MTC와 Critical MTC 를 제공하여 다양한 사물인터넷

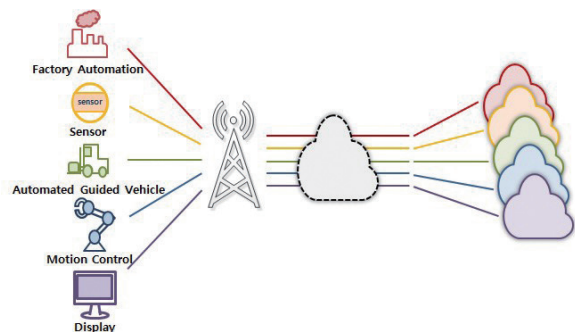


그림 3. 네트워크 슬라이싱 개념

서비스를 제공할 수 있어야 하며, 이는 시간이 지남에 따라 더욱 다양해 질 것으로 예상된다. 따라서, 각 사용자의 목적에 맞는 서비스 품질을 제공할 수 있도록 네트워크가 매우 유연해질 필요성이 제기되었고, 이를 해결하기 위한 네트워크 슬라이싱(network slicing)이 개념이 제시되었다[8]. 네트워크 슬라이싱은 <그림 3>과 같이 다양한 서비스품질 제공을 위해 서비스품질 별로 네트워크를 가상적으로 분할하여 처리하는 개념이다. 다양한 사물인터넷 서비스를 제공해야 하는 차세대 이동통신에 적합한 개념이지만 이제까지와 같이 전용 네트워크 장비를 통해 구현하는 것은 적합하지 않으며 이를 저가로 유연하게 구현하기 위해서는 새로운 개념의 네트워크 구성을 필요로 하게 된다.

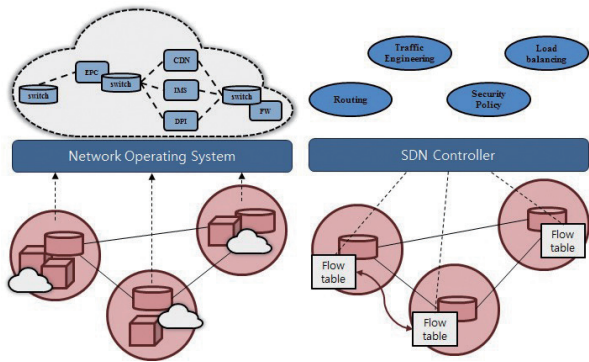


그림 4. NFV와 SDN 개념

<그림 4>는 네트워크 슬라이싱 개념을 범용 네트워크 장비를 통해 구현하기 위한 방안으로 네트워크의 여러 기능을 신규/전용 장비를 통하지 않고 가상 머신을 통해 구현하는 네트워크 구조 개념인 네트워크기능 가상화(network functions virtualization, NFV)와 개방형 오픈플로우를 통해 네트워크의 트래픽 전달 동작을 소프트웨어 기반 제어기에서 제어/관리하는 개

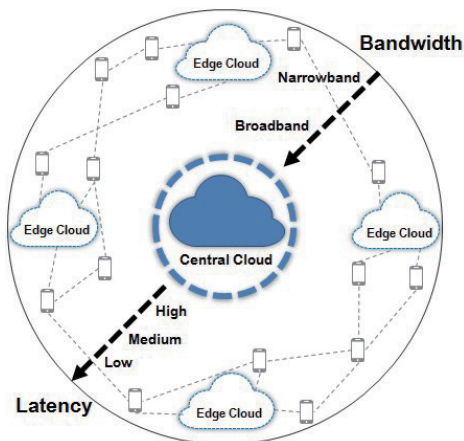


그림 5. 중앙서버와 분산서버의 비교

념인 소프트웨어정의 네트워크 (software defined network, SDN)를 소개한다[9].

사물 인터넷 서비스를 제공하기 위한 정보취합 및 처리를 위한 클라우드 컴퓨팅(cloud computing)은 <그림 5>와 같이 데이터 센터가 있는 중앙 서버를 기반으로 하여 다수의 분산 서버와 단말을 포함하여 정보를 취합하고 각 컴퓨팅 자원을 효율적으로 활용한다[10]. 중앙 서버는 광역 사물인터넷 서비스를 제공하기 위해 각 단말의 정보를 취합하고 처리하며 이를 위해 분산 서버 및 각 단말과의 클라우드 컴퓨팅을 수행한다. 또한, 각 분산 서버는 좁은 영역에서의 사용자 간의 상호작용을 센싱/처리하여 제어하는 사물 인터넷 서비스를 저지연으로 제공하기 위해 각 사용자 단말과의 클라우드 컴퓨팅을 수행하게 된다.

2. 무선 다중접속 기술

4 세대 이동통신 시스템인 LTE-A 시스템에서는 동기화된 기지국과 단말 간에 서로 직교하는 자원을 구성하여 각 사용자에게 할당하는 직교다중접속 (orthogonal multiple access, OMA) 방식을 사용하였다. 이러한 동기화 기반의 직교다중접속 방식은 사용자간 간섭이 없어 높은 신호대 잡음비를 얻을 수 있어 비교적 간단하게 높은 전송율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 1) 정보이론적으로 최적의 다중접속 방식이 아니고, 2) 자원의 수에 따라 동시에 지원 가능한 사용자의 수가 결정되며, 3) 직교자원을 구성하고 동기화를 유지하기 위한 무선자원 오버헤드가 비교적 크다는 특성이 있다. 따라서, 비슷한 무선자원 오버헤드를 사용하면서도 주파수 효율성을 보다 높이기 위해서는 정보 이론적으로 최적에 가까운 다중접속 방식을 고려할 필요가 있으며, 또한 초연결성을 필요로 하는 massive MTC에 적합하도록 비교적 낮은 오버헤드로 다수의 단말에 무선접속을 제공해야 할 필요가 있다. 이러한 다양한 서비스를 위해

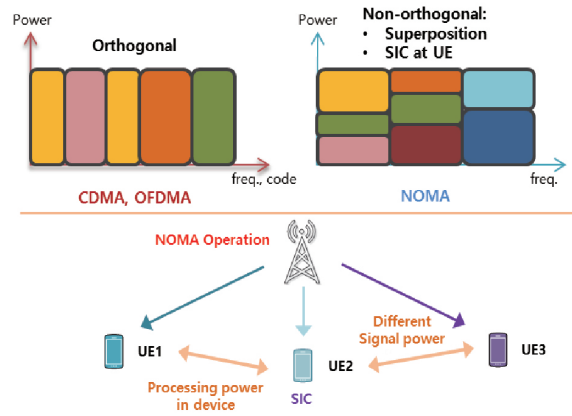


그림 6. 기본적인 NOMA 작동원리

동기/비동기 기반의 여러 비직교 다중접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)방식이 고려되고 있다.

〈그림 6〉은 시스템의 연결성을 높이고 주파수 효율을 개선하기 위해 동기화 기반의 직교 무선 자원 위에서 하나의 자원당 하나 이상의 단말을 수용하여 전력분할을 통해 다중접속을 제공하는 비직교 다중접속 방식의 일례를 나타내며, 이러한 방식 가운데 대표적인 것이 일본의 NTT DoCoMo에서 제안한 NOMA (non-orthogonal multiple access) 방식이다[11]. 단말 수신단에서 순차적인 복호 및 간섭제거를 수행해야 하지만 OMA대비 주파수 효율과 무선 자원당 연결성을 개선할 수 있다.

〈그림 7〉은 역시 동기화 기반의 직교 무선 자원 위에서 각 단말의 부호화된 블록을 분산적으로 희박하게 (sparsely) 배치되 자원 수보다 많은 단말의 신호를 최대한 균일하게 섞이도록 배치하는 비직교 다중접속 방식의 일례를 나타내며, 이러한 방식 가운데 대표적인 것이 중국의 Huawei에서 제안한 SCMA (sparse code multiple access)이다[12]. 다수 단말의 연결성을 제공하면서도 비교적 낮은 복잡도의 수신기를 사용할 수 있다.

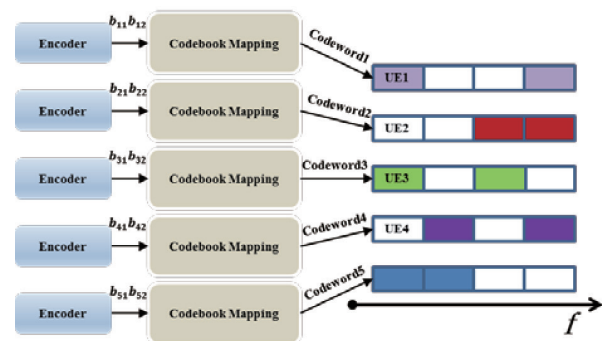


그림 7. SCMA의 기본 개념

하지만 위와 같은 비직교 기반의 다중접속 기술이 주파수 효율성 개선 및 연결성 개선 면에서 어느 정도의 장점이 있기는 하지만 단말당 고용량 데이터 전송에 적합하지 않으며 저지연 제공에 적합하지 않다는 단점이 있다. 따라서, 다양한 사물인터넷 서비스를 제공해야 하는 차세대 이동통신 시스템을 위해 더 다양한 서비스 요구 조건을 만족할 수 있는 다양한 무선 다중접속 기술에 대한 연구가 반드시 필요하다.

3. 고효율/고신뢰 통신기술

거대안테나배열 다중입출력 (Massive MIMO) 기술은 〈그림 8〉과 같이 기지국에서 다수의 송수신 안테나를 이용하여 다수 사용자를 위해 공간자유도를 극대화하여 다수의 사용자에게 간섭 없이 동시에 정보를 송신하거나 높은 다이버시티의 빔을 형

성하여 사용자에게 매우 높은 신뢰성으로 정보를 전송할 수 있어 주파수 효율을 매우 높이고 정보 전달의 신뢰도를 높이는 데 가장 적합한 기술이다[13][14]. 일례로 Massive MTC를 위해 다수의 단말을 수용하는 다중사용자 다중입출력 (MU-MIMO) 형태로 연결성을 개선할 수도 있으며 각 단말의 공간 스트림의 수를 늘려 고용량 단말 서비스를 제공하여 주파수 효율을 제고할 수 있다. 또한, 다수의 안테나 배열을 이용하여 각 단말에 3차원 빔형성된 신호를 전송하여 단말 간의 간섭을 공간적으로 제어하고 무선 채널의 페이딩을 극복하여 주파수 고효율 특성 및 높은 신뢰도의 신호 전달을 제공할 수 있다. 매우 다양하고 많은 massive MIMO기술에 대한 연구가 진행되고 있으나 사물인터넷의 다양한 서비스를 제공하기 위해서 비동기/비직교 기반 다중접속에서도 쓰기에 적합한 massive MIMO기술에 대한 연구가 더 필요하다.

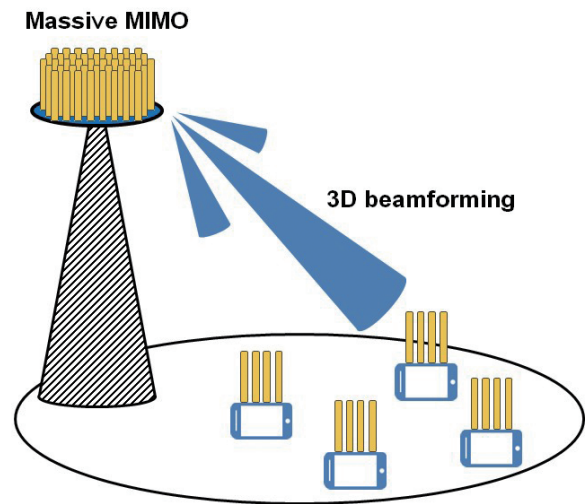


그림 8. Massive MIMO와 3D beamforming

또한, 기존의 주파수 분할 다중화 (FDD) 방식과 시분할 다중화 (TDD)방식의 각각의 장점을 이용하면서도 주파수 효율을 높이고 지연을 줄이기 위해 밴드내 전이중 다중화 (inband full-duplex) 방식에 대한 연구가 최근 매우 각광받고 있다 [15]. 이러한 전이중 다중화 방식은 각 기지국 및 단말에서 송수신을 동시에 수행하기 위해 자기간섭 제거 및 단말간 간섭제거를 수행해야 한다는 단점이 있지만 〈그림 9〉에 나타나 있듯이 단순히 주파수 효율을 2배로 높이는 데 그치는 것이 아니라 무선 채널의 가역성 (reciprocity)을 이용하여 파일럿 오버헤드를 최소화할 수 있는 TDD의 장점을 가지면서도 기지국과 단말간 동시송수신을 통해 지연을 최소화할 수 있는 FDD의 장점을 동시에 가질 수 있어 초저지연/고효율 특성을 제공하기 위해 매

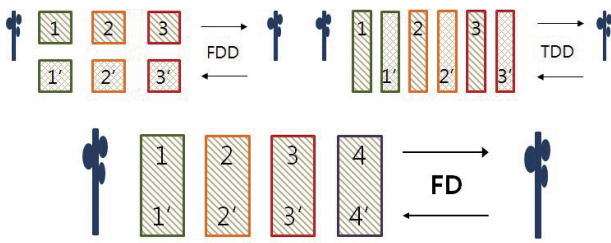


그림 9. FDD, TDD 방식과 밴드내 전이중 다중화

우 적합한 기술이다. 하지만, 이를 위해서는 다수 안테나가 있는 상황에서 자기간섭 제거 및 단말간 간섭제어를 수행할 수 있는 연구가 필요하다.

4. 무선 웨이브폼 기술

앞에서 설명한 바와 같이 다양한 사물인터넷 서비스를 제공하기 위해서는 동기화 기반의 직교자원을 이용한 다중접속 방식 뿐 아니라 비동기/비직교 기반의 다중접속 방식을 제공해야 할 필요가 있으며, 특히 초연결성, 초저지연, 고효율을 동시에 제공하기 위해서는 4세대 LTE-A 시스템에 사용한 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 기반의 웨이브폼 기술에 더하여, 비동기/비직교 기반의 다중접속 상황에서 간섭에 강인하고, 초저지연을 제공하기 위해 짧은 길이의 심볼과 프레임 구성하기에 적합하며 주파수 고효율 및 고신뢰 통신을 위한 기술을 접목하기에 적합한 특성을 가져야 한다.

위와 같은 다양한 특성을 만족하기 위해 다양한 웨이브폼 기술이 연구되고 있으며, 그 가운데 일례로 필터뱅크 다중반송파 (filter-bank multi-carrier, FBMC) 기술과 보편적 필터기반 다중반송파 (universal-filtered multi-carrier, UFMC) 기술 등이 연구되고 있다[16]. <그림 10>에 나타나 있듯이 FBMC는 각 부반송파 단위로 필터링을 해줌으로써 부반송파별 부대역 (side-lobe) 전력을 최소화하여 비동기 기반 다중접속에 사용하기 적합하며, UFMC는 여러 개의 부반송파로 구성된 서브밴드(Sub-band) 단위로 필터링을 하여 FBMC보다 낮은 복잡도를 가지면서도 서브밴드 대역의 방출(out-of-band emission, OOB)을 줄여 역시 비동기 기반 다중접속에 사용하기 적합하다. 따라서, 비교적 낮은 무선 오버헤드로 다수 연결성을 확보하기 위한 다중접속 방식을 위해 사용하기에 적합하지만 필터의 시간지연으로 인해 저지연 통신에 적합하지는 않으며 고효율/고신뢰 통신 방식과 접목하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

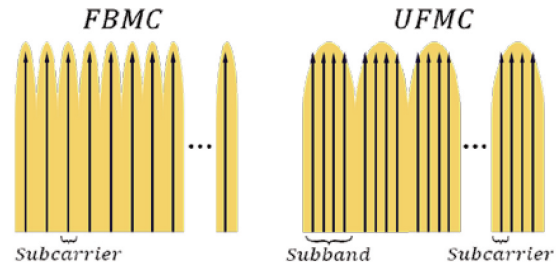


그림 10. FBMC, UFMC, GFDM의 필터링 개념

또한, 기존의 OFDM 기술을 일반화한 보편적 주파수분할 다중화 (general frequency division multiplexing, GFDM) 기술은 하나의 심볼이 갖는 부반송파의 수와 서브심볼의 수를 필요에 따라 적합하게 조절할 수 있어 다양한 서비스 요구사항에 따라 웨이브폼을 설계할 수 있다[17]. 이러한 GFDM의 일례 또한 <그림 10>에 나타나 있다. 이 때, 송신단 필터 특성과 부반송파의 대역폭에 따른 주파수 선택성으로 인한 심볼간 간섭 (inter-symbol interference) 및 반송파간 간섭(inter-carrier interference)을 해결하기 위한 수신단 신호처리가 필수적이다. OOB 특성이 FBMC나 UFMC보다는 떨어지지만 OFDM보다는 우수하여 비동기 기반의 다중접속에 사용이 가능하면서도 OFDM과 비슷하거나 조금 더 짧은 수준의 심볼 주기로 필터 시간 지연 없이 제공 가능하다. 고효율/고신뢰 통신 방식과 접목하고 다양한 초저지연 서비스에 적합하도록 하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

위와 같이 다양한 웨이브폼 기술이 연구되고 있지만 다양한 사물인터넷 서비스를 제공해야 하는 차세대 이동통신 시스템을 위해 더 다양한 서비스 요구 조건을 만족할 수 있는 다양한 무선 웨이브폼 기술에 대한 연구가 반드시 필요하며, 특히 비동기/비직교 기반의 다중접속 기술을 적용하기에 적합하면서도 고효율/고신뢰 통신기술과 접목하기 적합하여 주파수 효율성과 단말 연결성을 높이면서도 단말당 고용량 데이터 전송을 제공할 수 있고, 동시에 초저지연 제공에 적합한 웨이브폼 기술 연구가 필요하다.

IV. 결론

본고에서는 최근 화두로 떠오르고 있는 다양한 사물인터넷 서비스를 제공하기 위한 통신방식의 특징으로 Massive MTC와 Critical MTC의 개념과 통신 요구조건에 대해 설명하고, 이러한 다양한 통신 요구조건을 만족하기 위해 차세대 통신 시스템이 제공해야 하는 초저지연, 고효율, 대규모 연결성을 지원하기 위한 네트워크 기술, 무선 다중접속기술, 고효율/고신뢰 통신기술, 무선 웨이브폼 기술의 연구 동향 및 향후 연구 방향을 제시하였다.

Acknowledgment

This work was supported by ICT R&D program of MSIP/IITP, {B0126-15-1012, Multiple Access Technique with Ultra-Low Latency and High Efficiency for Tactile Internet Services in IoT Environments}

참고 문헌

- [1] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: a survey," *Computer Networks*, vol. 54 pp. 2787-2805, Oct. 2010.
- [2] 민경식, "사물 인터넷(IoT)의 시장 정책동향 분석," *인터넷&시큐리티 이슈*, pp. 3-33, 2012년 9월.
- [3] 신동희, 정재열, 강성현, "사물인터넷 동향과 전망," *인터넷 정보학회지 제14권 제2호*, pp. 32-46, 2013년 6월.
- [4] IMT-2020 (5G) Promotion Group, "5G vision and requirements," May, 2014.
- [5] R. Ratasuk, A. Prasad, Z. Li, A. Ghosh, and M.A. Uusitalo, "Recent advancements in M2M communications in 4G networks and evolution towards 5G," in *Proc. 18th Inter. Confer. Intellig. Next Gen. Netw. (ICIN)*, Paris, Feb., 2015, pp. 52-57.
- [6] G. Fettweis, et. al., "The tactile internet," *ITU-T Technology Watch Report*, Aug. 2014.
- [7] P. K. Agyapong et al., "Design Considerations for a 5G Network Architecture," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, Nov, 2014, pp. 65-75
- [8] S. Mazur, "The next generation innovation platform," <http://netfutures2015.eu/wp-content/uploads/2015/04/5.Ericsson-Sara-Mazur-March-25-2014.pdf>.
- [9] R. Jain and S. Paul, "Network virtualization and software defined networking for cloud computing: A survey", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 11, pp.24-31, Nov., 2013.
- [10] A. Chandra, et. al., "Decentralized Edge Clouds," *IEEE Internet Computing*, vol. 8, no. 5, pp. 70-73, Sep., 2013
- [11] Y. Saito, et. al., "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access," *Proc. of IEEE VTC spring 2013*, June, 2013.
- [12] H. Nikopour, and H. Baligh, "Sparse code multiple access," *IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, Sep., 2013, pp. 332-336.
- [13] L. Lu, et. al., "An overview of massive MIMO: benefits and challenges," *IEEE J. Sel. Topic Sig. Proc.*, vol. 8, no. 5, Oct., 2014.
- [14] J. Koppenborg, H. Halbauer, S. Saur, and C. Hoek, "3D beamforming trials with an active antenna array," *International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, Dresden, 7-8 Mar., 2012, pp. 110-114.
- [15] A. Sabharwal et al., "In-Band full-duplex wireless: Challenges and opportunities," *arXiv:1311.0456*.
- [16] P. Banelli, et. al., "Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 31, no. 6, Nov., 2014.
- [17] N. Michailow et. al., "Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 9, pp. 3045-3061, Sep., 2014

약 력



최 경 준

2010년 연세대학교 학사
2010년~현재 연세대학교 통합과정
관심분야: Massive MIMO, 협력통신, 비직교 다중 접속



이 진 념

2015년 인하대학교 학사
2015년~현재 연세대학교 석사과정
관심분야: New waveform, 전이중 통신



김 종 현

2010년~현재 연세대학교 학사과정
관심분야: New waveform, 다중 접속



김 광 순

1994년 한국과학기술원 학사
1996년 한국과학기술원 석사
1999년 한국과학기술원 박사
1999년~2000년 Dept. ECE, UC San Diego,
박사후연구원
2000년~2004년 ETRI 선임연구원
2004년~현재 연세대학교 교수
관심분야: 통신이론, 변복조 방식, 다중접속 방식,
다중사용자/다중셀 다중 안테나 시스템,
이중 셀룰러 네트워크 최적화