

한계 없는 무선통신 실현을 위한 기술 동향

Research Trends on Limitless Connections in Wireless Transmission and Access Technologies

김근영 (Keunyoung Kim, kykim12@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 책임연구원
김광선 (Kwang Seon Kim, gskim@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 책임연구원
명정호 (Junggho Myung, jhmyung@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 선임연구원
윤찬호 (Chanho Yoon, chyoon@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 선임연구원
신우람 (Wooram Shin, w.shin@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 선임연구원
김철순 (Cheulsoon Kim, cs.kim@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 선임연구원
고영조 (Young Jo Ko, koyj@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 책임연구원
문성현 (Sunghyun Moon, sh.moon@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 선임연구원
김경표 (Kyeongpyo Kim, kpkim@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 선임연구원
김태중 (Tae Joong Kim, aisma@etri.re.kr)	미래이동통신연구본부 책임연구원/본부장

The capacity of wireless communications has been considered to be restricted by their fundamental limits, which were first formulated by Shannon in 1948. These limits are for the communication environment that is composed of a transmitter and receiver pair. However, there are usually more than one simultaneously communicating pairs in the environment. In such cases, the capacity is not known. Moreover, performance requirements have been diversified with the development of technology. We believe that wireless communication technologies will eventually progress toward limitless connections. Various wireless transmission and access technologies are introduced in order to overcome their limitations.

* DOI: 10.22648/ETRI.2019.J.340106



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

- I. 머리말
- II. 이론적 한계
- III. 용량/지연 한계
- IV. 접속/간섭 한계
- V. 지연/이동/구현 한계
- VI. 맺음말

I. 머리말

1948년 C. Shannon은 전송 채널 용량의 한계를 제시하며 통신 발전의 토대를 세웠다. 하지만 이러한 한계는 단일 송수신기로 구성된 통신 환경에서 한계이며, 아직까지 다수 개의 송수신기로 구성된 일반적인 통신환경에서 이론적 한계는 규명되지 않은 상황이다. 또한, 전송 속도 위주 발전에서 벗어나 5G 이동통신은 지연, 연결 수, 신뢰성 등 다양한 요구사항을 만족하는 기술을 요구하고 있다. 향후 무선통신에 대한 요구사항은 더욱 더 늘어날 것이고, 이러한 요구사항을 만족하기 위한 무선통신기술의 발전은 궁극적으로 한계 없는 무선통신기술 실현이라는 목표를 지향할 것으로 기대된다.

본 고에서는 무선통신기술의 다양한 한계를 짚어보고, 이러한 한계를 극복하기 위한 이론 및 기술적인 시도와 동향을 소개한다.

II. 이론적 한계

1. 단일 송수신기 환경 이론적 한계

1948년 C. Shannon이 정립한 정보이론은 무선통신의 이론적 한계를 제시하여 왔다[1]. 전송률의 대표적인 이론적 한계인 용량(capacity)은 특정 방식을 통해 달성할 수 있는 전송률의 하한과 특정 값 이상 달성할 수 없는 상한이 만나는 지점이다. 전송률의 하한을 보이는 방식은 랜덤하게 부호어를 생성하며 부호어의 길이를 무한대까지 증가하게 되면 큰수의 법칙(law of large numbers)에 의해 랜덤한 성질이 사라지고, 평균 오류율이 0으로 수렴하는 것을 보이는 것이 일반적이다[2]. 전송률 상한을 보이는 방식은 수학적 부등식이나, 특정 조건을 이완하여 일정 값보다 전송률이 클 수 없을 보이는 것이 일반적이다. 정보이론에서의 용량은 어떠한 방식을 사용하더라도 넘어설 수 없는 한계를 의미한다.

아래 송신전력의 평균(P)과 잡음전력의 평균(N)으로

표현된 통신에서의 용량(C)으로 유명한 Shannon 한계는 하나의 송신기와 하나의 수신기로 구성된 가우시안 채널에서의 한계이다.

$$C = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N} \right). \quad (1)$$

무선통신은 Shannon 한계에 도달하기 위해 많은 노력을 기울여왔다. Shannon이 제시한 한계 도달 방안은 랜덤부호화를 이용한 방안으로 실제 구현이 어려운 것이었다. 초기에는 선형부호화 등 수학적 구조를 활용한 부호화 방식을 사용하였으나, Shannon 한계와는 차이가 있었으며, 1993년 Shannon 한계에 근접하는 터보부호화가 제안되었다[3]. 터보부호화 방식은 이동통신 및 무선랜 등 대부분 무선통신기술의 표준이 되었다. 1995년에는 복잡도로 인해 묻혀있던 Gallager가 제안한 low density parity code 재발견하였으며, 2001년에는 Shannon 한계에 0.0045dB에 근접하는 것을 보였다[4]. 2009년에는 실제 Shannon 한계에 도달하는 부호화 방식인 극부호화 방식이 제안되었다[5]. 1948년에 제시된 Shannon 한계는 60여 년이 지나서야 달성 가능하게 되었다.

하나의 송신기와 하나의 수신기로 구성된 통신 환경에서 용량을 증가시키는 대표적인 방식이 송수신기에 다수 개의 안테나를 활용하는 것이다. 송수신기에서 채널 정보를 알고 있으면, 채널의 특이값 분해를 이용하여 송수신 빔포밍과 특이값에 반비례한 전력 할당을 통해, 송수신 안테나 수에 비례한 용량 증가가 가능하다는 것이 규명되었다[6]. 다수 안테나는 용량 증대뿐 아니라 동일한 데이터를 전송하여 오류율을 낮추기 위한 방식으로 활용될 수 있으며, 용량 증대와 오류율 감소와는 서로 tradeoff 관계에 있다[7].

2. 다수 송수신기 환경 이론적 한계

Shannon 한계는 단일 송수신기로 구성된 통신 환경

에서의 한계이다. 그러나 일반적인 통신 환경은 다수의 송신기 혹은 다수의 수신기로 구성된 경우가 대부분이다. 단일 송수신기로 구성된 통신 환경에서는 가우시안 잡음과 같은 잡음 처리가 중요한 문제였으나, 다수 송수신기로 구성된 통신 환경에서는 잡음보다는 간섭 처리가 매우 중요한 문제이다. 간섭을 처리하는 방식은 크게 간섭을 잡음처럼 취급하거나, 간섭을 회피하거나, 간섭을 제어하는 3가지 방식으로 구분할 수 있다. 현재의 통신 시스템은 대부분 간섭을 잡음처럼 취급하거나, 사용하는 자원을 겹치지 않게 할당하는 직교 방식을 활용하여 간섭을 회피하는 방식을 사용하고 있다. 간섭 회피를 위해 서로 다른 자원을 활용하여 데이터를 송수신하는 방식은 복잡도를 낮출 수 있지만, 송수신기 수가 증가함에 따라 각 송수신기당 사용할 수 있는 자원이 감소하기 때문에 전송률 감소를 피할 수 없다.

다수 송수신기로 구성된 통신 환경에서는 직교 방식을 통한 이론적 한계 용량에 도달할 수 없다. 정보이론에서는 다수 송신기와 하나의 수신기로 구성된 통신 환경을 다수접속채널(multiple access channel), 단일 송신기와 다수 수신기로 구성된 통신 환경을 방송채널(broadcast channel), 다수 송신기와 다수 수신기로 구성된 통신 채널을 간섭채널(interference channel), 이라고 한다[8].

다수접속채널은 다수 개의 송신기가 존재하므로, 전송률의 이론적 한계인 용량이 하나의 값이 아닌 영역으로 구성된다. 다수접속채널에서 용량에 도달하는 방식은 수신기에서 수신 신호의 세기에 따라 간섭을 순서대로 제거하는 방식을 통해 용량에 도달할 수 있다.

일반적인 방송채널에서는 아직까지 용량이 규명되지 않았으나, 가우시안 방송채널의 경우, 송신기에서는 신호를 더해서 전송하는 중첩부호화 방식을 사용하고 수신기에서는 간섭 제거하는 방식이 용량에 도달하는 방식임이 규명되었다. 다수 안테나 가우시안 방송채널의

경우에는 각 안테나가 미치는 간섭에 맞추어 데이터를 전송하는 더티페이퍼 코딩 방식을 활용하여 용량에 도달할 수 있다[9].

일반적인 간섭채널의 경우는 가장 간단한 두 개의 송신기와 두 개의 수신기로 구성된 환경에서도 용량이 규명되지 않았으며, 간섭이 신호보다 센 경우는 간섭 제거하는 방식으로 용량에 도달할 수 있다. 두 개의 송수신기로 구성된 간섭채널에서 현재까지 최적의 방식은, 송신기에서 두 수신기가 복호해야 하는 신호와 잡음처럼, 취급해야 하는 신호를 더해서 전송하는 중첩부호화 방식을 사용하고, 수신기에서는 일부를 복호하여 일부는 잡음처럼 취급하는 방식인 Han-Kobayashi 부호화이다. 가우시안 간섭채널에서 용량은 아직 규명되지 않았으나, Han-Kobayashi 부호화 방식을 사용하면 각 송수신기 쌍의 전송률과 용량 차이가 $1/2\text{bit}$ 보다 크지 않다는 것은 규명되었다[10].

간섭채널에서 전송률의 한계인 용량은 밝혀지지 않았으나, 신호대잡음비가 높은 영역에서 간섭채널 용량을 단일 송수신기 통신 환경 용량으로 나눈 값인 자유도는 일부 규명되었다. 자유도는 독립적으로 전송 가능한 신호의 수를 의미하며 자유도가 증가하면 용량도 같이 증가한다고 할 수 있다. K 개의 송수신기 쌍으로 구성된 간섭채널에서 K 차원 공간에서 간섭신호를 $K/2$ 차원으로 정렬되도록 전송하는 간섭정렬 방식을 통해 자유도가 $K/2$ 가 된다는 것이 규명되었다[11]. 단일 송수신기 통신 환경에서 송수신기가 K 개의 다수 안테나를 사용할 자유도는 K 이나, K 개의 송수신기로 구성된 간섭채널에서는 자유도가 K 가 아닌 $K/2$ 로 감소하나, K 에 선형비례하므로, 간섭채널에서도 송수신기 쌍이 증가할 경우, 용량도 이에 비례하여 증가할 수 있다. 즉, 직교 방식을 사용할 경우, 용량은 일정한 값으로 고정되나, 간섭정렬 등의 방식을 사용할 경우, 용량은 선형적으로 증가할 수 있다.

III. 용량/지연 한계

1. 테라헤르츠 대역 전송 기술

테라헤르츠파는 일반적으로 0.1~10THz 대역의 주파수 대역을 지칭하는데 전자기파 스펙트럼에서 보면 원적외선과 밀리미터파 중간 영역에 해당하며 현재까지 많은 상용화가 되지 않은 미개척 주파수 전자파 자원이다. 테라헤르츠 주파수 대역은 분자 운동의 진동 주파수 영역이기 때문에 물질의 성분 분석에 적합하여 물질의 물성, 분자, 생명 연구 등을 위한 분광 시스템, 측정된 분광 특성을 2차원 또는 3차원의 이미지로 형상화하는 이미징 시스템에 많이 연구되어 왔고 넓은 주파수 대역폭을 이용한 초고속 무선 통신 시스템에도 응용이 가능하다[12], [13].

테라헤르츠 주파수 대역의 무선통신 적용을 위한 전파 모델 연구에 대해 기본 데이터인 전파 특성을 분석한 실측 데이터는 제공되지 않으며, 기존 논문에 나타난 테라헤르츠 주파수 대역에서 채널 모델링도 Short-range에 국한된 실내 채널 모델링이 대부분이다. 테라헤르츠 주파수 대역을 무선 채널로 규정하는 표준화 단체로 IEEE802.15.3d가 있는데 테라헤르츠 주파수 대역에서 사용할 수 있는 4가지 응용분야를 정의하고 이 중에서 무선 백홀 시나리오에 해당하는 응용분야의 채널 모델은 LOS만을 가정하여 경로 손실만을 고려하고 있다[14]. 3GPP에서는 5G NR을 위해 100GHz까지 지원하는 채널 모델을 정의하고 링크 레벨의 시뮬레이션 용도로 NLOS/LOS를 합쳐 5가지 CDL/TDL 채널 템 계수를 참조용으로 제시하고 있으나 200GHz 이상에 대해서는 아직 제공하고 있지 않다[15].

앞에서 언급한 대로 200GHz 이상의 테라헤르츠 주파수 대역에 대한 표준은 2017년도에 표준화한 IEEE 802.15.3d이다. IEEE 802.15.3d에서는 275GHz 이상 주파수 대역에서 근거리 및 무선 백홀용 규격을 발표하였다[〈표 1〉 참조]. 대역폭은 2.16GHz부터 전체

〈표 1〉 IEEE 802.15.3d의 주요 규격

번호	항목	규격	
1	주파수	252~325GHz	
2	대역폭	2.16, 4.32, 8.64, 12.96 17.28, 25.92, 51.84, 69.12GHz	
3	변조 방식	$\pi/2$ 8-PSK, $\pi/2$ 8-APSK, 16-QAM, 64QAM	OOK 방식도 지원
4	전송 속도	Max. 275.97Gbps Max. 45.99Gbps	69.12GHz, 64QAM OOK Mode
5	수신 감도	-32dBm -48dBm	69.12GHz, 64QAM OOK Mode

69.12GHz까지 여러 가지 단계의 대역폭을 지원하고 $\pi/2$ 8-PSK에서부터 64QAM까지 고차변조방식을 사용하는 것으로 되어 있다[16]. 이 규격은 최초의 표준 규격이기는 하지만 현재 기술로 근거리를 제외한 응용에서 구현은 매우 어려운 규격이다.

테라헤르츠 주파수 대역 기술에 대한 중요성이 높아짐에 따라서 유럽연합의 Horizon 2020에서는 Terapod와 Terranova 같은 Project를 지원하여 수행하고 있다. Terapod Project는 초광대역 폭 신호를 이용하여 1Tbps 급 전송을 위한 부품을 개발하는 것을 목표로 하고 있고, Terranova Project는 275GHz이상 주파수 대역에서 광선로 수준인 최대 1Tbps 급의 안정하고 우수한 성능의 백홀 링크를 구성하는 것을 목표로 하고 있다[17], [18].

테라헤르츠 주파수 대역의 상용품 안테나는 대부분 혼안테나나 카세그레인 같은 고이득 반사판 안테나이고 근거리용으로 300GHz 대역에서 8×8 배열 구조를 적용한 배열 패치 안테나가 발표되었다[19]. 테프론 기판을 사용하였으며 최대 이득은 16dBi이다. 이론상 1,000개의 방사 소자를 사용했을 경우 30dBi의 이득을 얻을 수 있고 현재 200~300GHz 대역에서의 개발된 배열 패치 안테나도 비슷한 수준이다.

단방향 링크 수준이기는 하지만 테라헤르츠 주파수 대역에서 무선통신에 대한 연구결과가 많이 나오고 있

다. 대표적으로 일본의 NTT에서는 광학기반의 무선 송수신 장치부터 오랫동안 테라헤르츠 대역 시스템 개발을 해오다가 자체 InP 공정으로 소자를 개발하고 외부에 도파관 인터페이스를 가지는 고이득 안테나를 사용하여 무선전송 시험을 하였다. 최대 32GHz 대역폭에 16QAM 변조방식을 사용하여 100Gbps 전송 시험을 하였다. LO는 체배 방식을 사용하였고 헤테로다인 방식의 구조를 사용하였다[20].

독일 부퍼탈대학에서는 SiGe 기반 소자에 온칩안테나를 사용하여 240GHz 대역에서 65Gbps급 무선 전송 시험을 진행하였다. 직접변환방식을 사용하였고 LO는 16배 체배방식으로 외부에서 입력하는 구조로 되어 있다. 안테나는 온칩안테나로 구현하였고 안테나 이득을 높이기 위해 실리콘 렌즈를 추가로 사용하였다[21].

현재까지 테라헤르츠 주파수 대역에서 초광대역 폭 신호를 이용하는 무선통신 기술은 근거리 전송 결과만 있지만 100Gbps 이상의 전송이 가능함을 보였고 전기적 소자 또한 300GHz 이상 특성을 보이고 있어 출력전력과 배열 안테나에 대한 기술이 더해지면 충분히 이동통신으로 적용이 가능해 보인다.

2. 무선캐싱 기술

무선 캐싱 기술은 콘텐츠를 기지국이나 단말의 저장장치에 미리 저장하고 사용자가 요구할 때 저장된 콘텐츠를 제공하는 기술로, 백홀 링크의 부담을 줄일 수 있을 뿐 아니라 사용자에게 저지연시간 서비스를 제공할 수 있는 유망 기술로 학계와 산업계의 주목을 받고 있다. 더불어 저장 장치의 단위 용량당 가격은 시간이 지날수록 낮아지고 있기 때문에 저장 장치를 통신 강화 목적으로 사용하는 무선 캐싱 기술은 점점 더 각광을 받고 있다.

무선 캐싱 기술은 저장장치의 위치에 따라 연구 방향이 다르게 진행되어 왔다. 송신기에 저장장치가 위치한 경우에는 백홀 링크의 부담을 덜기 위한 목적으로, 송신

기의 저장장치에 어떤 콘텐츠를 얼마만큼 저장하는가에 집중되어 연구되어 왔다. 무한에 가까운 콘텐츠 수에 비해 이용할 수 있는 저장장치의 용량은 유한하기 때문이다.

일반적으로 콘텐츠에 대한 사용자의 요구는 Zipf 분포를 따르기 때문에[22], 사용자의 요청 분포 중 가장 요청 확률이 높은 콘텐츠부터 차례로 저장하는 것이 최적으로 알려져 있다[23]. 다수 사용자가 여러 개의 캐시를 가진 송신기에 동시 접속이 가능한 경우 고려해야 할 요소들이 더 많아진다. [24]와 [25]에서는 위와 같은 환경에서, 사용자가 요청할 파일을 기지국이 가지고 있을 확률을 최대화할 수 있도록 분산 캐싱 최적화 문제를 공식화하였고 사용자 주변에 다양하게 파일을 저장할 방법에 대한 연구가 진행되었다.

수신기에 저장장치가 위치한 경우에는 저장장치에 저장된 정보를 부가 정보로 이용하여, 네트워크 전송 용량을 증가하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. [26], [27]에서는 다수 수신기의 저장장치에 전체 콘텐츠의 일부분을 저장하고, 다수 사용자의 서로 다른 콘텐츠 요청을 인덱스 부호화 형태로 결합하여 전송하는 기법을 제안하였다. 부호화된 전송 신호는 수신기에서 자신의 저장장치에 저장된 부가 정보를 활용하여 자신에게 필요한 파일로 복호된다. 즉, 서로 다른 사용자들에게 적절한 사용자 그룹화 및 인덱스 부호화를 통해 멀티캐스트 신호로 데이터를 동시 전송함으로써, 네트워크 전송 용량이 크게 증가할 수 있다.

기존 무선 캐싱 기술에서는 주로 메모리 용량, 위치 및 무선 전송기법 등과 같은 물리적인 요소를 기반으로 설계 및 이론적 성능 분석에 대한 연구를 진행했다면, 최근에는 사용자의 사회적 정보 및 이동성 등 다양한 변수들을 고려한 무선 캐싱 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. [28]에서는 물리적인 요소와 사회적 친밀도를 함께 고려하여 사용자 사이의 유효 거리를 정의하였고, 유효 거리와 게임이론 기반으로 콘텐츠를 저장하는 문제

를 연구하였다. 해당 기법을 통해, 콘텐츠 요청 사용자와 물리적으로 가깝더라도 유효 거리가 먼 사용자는 콘텐츠를 저장하지 않게 함으로써 콘텐츠 저장의 효율성을 증가시켰다. [29]에서는 유효 거리와 더불어 데이터 저장으로 발생하는 자원 소모에 대한 보상 개념을 추가하여, 네트워크 성능 최대화를 위한 캐싱 사용자들을 선택하는 방법과 콘텐츠 인기도 및 예상 지연 시간을 고려한 최적의 콘텐츠 저장 알고리즘을 제안하였다. 해당 기술을 통해 기존 기법들보다 전송 지연 시간을 크게 줄일 수 있음을 보여주었다. [30]에서는 무선 네트워크의 링크, 사회적 관계, 콘텐츠 관심도를 그래프로 표현하고, Hypergraph 이론을 적용한 사회적 관계기반 캐싱 구조를 제안하였다. 해당 기술에서는 사용자의 이동성을 사회적 친밀도의 요소로 활용하여, 사용자간의 통신 링크를 더 오래 지속할 수 있음을 보여주었다.

그 외로 다중 송신기 환경에서 협력 캐싱 및 전송기법에 대한 연구[31], 비직교 다중액세스 기반 캐싱 전략 연구[32] 등 다양한 통신 시스템 환경에서 활발히 연구되고 있다.

IV. 접속/간섭 한계

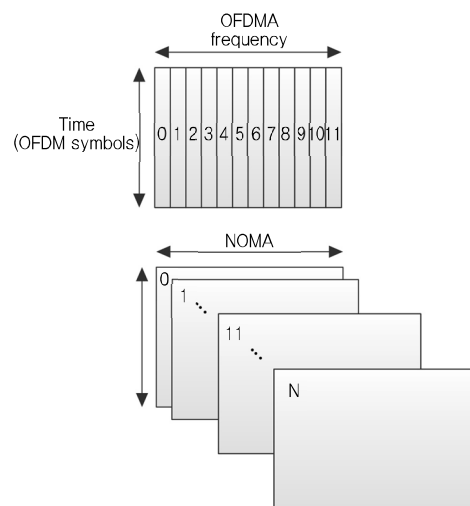
1. 비직교 다중화 방식

IMT-2020 표준 ITU-R M.2410-0 문서에서 제시되는 5G의 usage scenario는 크게 eMBB, URLLC, 그리고 mMTC로 나누어진다. 그 중 mMTC는 machine device 간의 통신을 목표로 한 부분인데, connection density가 KPI가 된다. 그러나 IIoT 환경에서 초연결 기술의 경우 usage scenario는 mMTC에 속하지만, 트래픽의 발생 특성은 빈도수는 mMTC 대비 매우 높은 편이고 1,000,000개의 device가 접속을 유지하는 connection density 요구사항을 만족 시켜야 하는 환경과는 거리가 멀다.

IIoT 시나리오에서 운용되는 무선 서비스의 커버리지

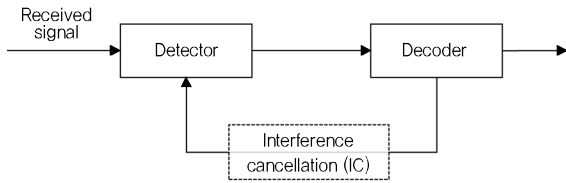
는 보통 공장 내에서 한정되어 있기 때문에 디바이스의 절대적인 수는 IMT-2020의 mMTC scenario의 요구사항만큼 높지는 않다. 공장 가동 명령을 무선통신으로 전달하는 경우 오로지 connection density보다는 지연과 신뢰도도 중요한 성능지표이라고 볼 수 있다. 그렇기 때문에 주어진 주파수 대역 내에서 트래픽 빈도가 mMTC보다 비교적 높은 환경에서 최대한 다수의 디바이스가 동시다발적인 통신을 할 수 있고, 신뢰도가 일정 수준까지 보장되는 무선 기술이 제공되어야 한다.

따라서 IIoT환경에서는 디바이스 간의 초연결과 신뢰도 및 저지연을 달성하기 위한 상향링크 다중화 방식의 선정이 중요하다. 다중화 방식은 기존 OFDMA와 같은 직교 방식과 최근에 각광을 받고 있는 비직교 방식을 선정할 수 있다. 먼저 직교 방식은 각 디바이스의 접속 링크의 직교성이 보장되기 때문에, 간섭은 타 셀의 상향링크 신호로 국한이 되어 전송 신뢰도 측면에서 유리하다고 볼 수 있다. 또한, 직교성이 보장이 되는 신호이기 때문에, 수신기는 저복잡도로 구현될 수 있다. 다만, 상향링크 신호 간의 직교성을 보장하기 위한 디바이스 별 독립적인 상향링크 자원 분배가 이루어지지만, (그림 1)과



(그림 1) 직교 와 비-직교 다중화 방식의 time 및 frequency 자원 분배 방식 차이

[출처] Reprinted from Ericsson, <https://www.ericsson.com/en>



(그림 2) 비-직교 다중화 방식의 신호 검출을 위한 반복적 간섭 제거 방식 block diagram

같이 상향링크에 할당된 자원은 다중화되는 상향링크 전송의 디바이스 수만큼 반비례하여 제공이 된다.

따라서 디바이스 수가 많으면 많을수록 디바이스별 상향링크에 할당되는 자원의 양은 줄어들게 된다. 자원이 줄어들게 되면 우선 무선통신의 신뢰도에 영향을 받을 수 있다. 또한, 자원의 부족함에 따라 동시에 많은 상향링크를 지원하기 위해 지연이 더 커지는 상황이 발생할 수 있다.

반면에 비직교 전송은 디바이스 수와 관계없이 디바이스는 다중화를 위해 주어진 대역폭을 다 공유하여 상향링크를 할당받고 전송하는 방식이다. 다만, 상향링크 신호 간의 직교성은 보장되지 않기에 상향링크 간의 간섭은 존재한다. 비직교 전송은 (그림 2)와 같이 상향링크 간의 간섭을 수신기에서 간섭 제거 기술을 통해 비직교 방식의 간섭을 극복하여 직교 방식에 비해 높은 connection density를 유지할 수 있다.

또한, 수신기 방식이 single user decoding이 아닌 벡터 형태로 maximum likelihood로 송신 신호를 추정하는 방식이라면 비직교 방식이더라도 신뢰도 또한 대폭 향상되기도 한다. 그리고 비직교 방식은 직교방식 대비 자원을 많이 할당받기 때문에, 지연을 줄이는 측면에서 더 유리할 수 있다.

상향링크 전송을 위한 자원 할당 scheduling은 grant 방식이 아닌 대부분 grant-free 전송으로 미리 상향링크 자원을 할당받는 형태로 구성될 가능성이 높다. IIoT 환경의 경우, 트래픽의 특성상 일정한 주기를 가지고 송수신을 하고, 데이터의 크기 자체가 크지 않기 때문에 grant 방식을 적용하는 데 따른 오버헤드를 줄이고 지

연 및 연결성을 높이는 측면에서 유리한 grant-free 방식이 주로 적용될 가능성이 높다.

2. 신파형 기술

5세대에 걸쳐 이동통신이 발전함에 따라 이동통신 인프라를 활용하는 응용 서비스가 다양화되고 사용자들의 트래픽 사용 요구가 더 증가됨에 따라, 이동통신 서비스는 더 높은 전송률뿐 아니라 더 낮은 전송 지연 그리고 더 높은 전송 신뢰성을 요구하고 있다. 이동통신 세대 간 진화에 있어 기저가 되는 요소는 파형 기술과 다중접속 기술이라 할 수 있다. 다수 사용자의 효율적인 데이터 송수신을 위해서는, 다수 사용자를 시간, 주파수, 공간, 코드 도메인 상에 상호 간섭 없이(또는 상호 간섭을 용이하게 극복할 수 있으면서) 주파수 효율적으로 접속할 수 있는 파형 기술이 요구된다. 1세대 이동통신에서는 Frequency Division Multiple Access (FDMA) 기술이, 2세대 이동통신에서는 Code Division Multiple Access(CDMA)와 Time Division Multiple Access (TDMA) 기술이, 3세대 이동통신에서는 Wideband CDMA(WCDMA) 기술이, 4세대[33] 및 5세대[34] 이동통신에서는 Orthogonal Frequency Division Multiple Access(OFDMA)와 Single Carrier Frequency Division Multiple Access(SC-FDMA) 기술이 적용되고 있다.

4세대부터 하향링크 광대역 전송을 위해 다중반송파 변복조 기반 OFDMA(TDMA와 FDMA의 결합 형태)이 도입되었는데, 이에 대한 파형 기술로써 높은 주파수 효율, 저복잡도 변복조, 채널 지연 확산에 대한 강인성, 비선택적 주파수 채널에 의한 단순한 등화구조, 다중안테나 기술의 용이한 확장성 등 장점을 갖는 Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multi-plexing(CP-OFDM)이 채택되었다. 상향링크에서는 Peak to Average Power Ratio(PAPR) 완화를 위해 CP-OFDM의 Inverse Fast Fourier Transform(IFFT) 수행 이전에 입력 데이

터 심볼들에 Discrete Fourier Transform(DFT) 전처리를 수행하는 Single Carrier Frequency Division Multiplexing(SC-FDM)이 채택되었다. 5세대에서는 4세대 파형 기술에 추가적으로 대역/단말 특정하게 설정 가능한 부반송파 간격(또는 심볼 길이)을 다양하게 제공하는 다중 뉴머롤로지(numerology)를 지원함으로써, 다양한 대역을 커버하고 채널 환경과 지연 요구사항에 적합한 파형을 유연하게 제공할 수 있다.

이러한 다중접속 기술을 가능케 하는 파형 설계에 있어, 성능 한계를 발생시키는 요인으로는 원 신호의 진폭 및 위상 왜곡, 사용자 내 심볼 간 간섭 및 반송파 간 간섭, 사용자 간 심볼 간 간섭 및 반송파 간 간섭, 파형의 비직교성으로 인한 내재 간섭, 인접 채널(또는 대역) 간 간섭, PAPR, 구현/계속 복잡도 등을 고려할 수 있다.

원 신호의 진폭 및 위상 왜곡은 채널 지연/도플러 확산, 반송파 주파수/심볼 타이밍/샘플링 클락 오프셋, 반송파 위상 잡음 등에 의해 발생된다. 진폭 및 위상 왜곡은 채널 추정과 추정된 채널을 이용한 등화 과정을 통해 보상될 수 있으나, 진폭 왜곡의 경우 복호 성능에 영향을 줄 수 있다.

사용자 내 심볼 간 간섭은 다중 경로에 의한 채널 지연 확산과 심볼 타이밍 오프셋에 의해 발생된다. 즉, 채널 지연 확산으로 인해 이전 심볼의 일부 샘플들이 현재 심볼에 중첩되거나, 송수신기 사이 타이밍 동기 오차로 인해 수신 구간 외 심볼에 속한 샘플들을 포함시켜 복조함으로써, 타 심볼로부터의 간섭을 받게 된다. 이를 완화하기 위해 보호 구간을 삽입하거나 오버샘플링과 펄스 성형을 통해 시간적으로 잘 국소화된 파형을 설계하는 방법이 있다. CP-OFDM 및 Zero Prefix OFDM(ZP-OFDM) 기술이 전자에 속하고, Pulse-Shaped OFDM(PS-OFDM)[35] 및 Filterbank Multicarrier(FBMC)[36] 기술이 후자에 속한다.

사용자 내 반송파 간 간섭은 송신기/수신기의 이동

성 또는 채널 경로상 반사체/산란체의 이동성에 의한 채널 도플러 확산과 반송파 주파수 동기 오차에 의한 반송파 주파수 오프셋, 송수신기 사이의 샘플링 클락 오프셋, 반송파 주파수의 주변 주파수들에서 나타나는 반송파 위상 잡음에 의해 발생된다. 반송파 간 간섭을 완화하기 위해서는 부반송파 간격을 증대시키거나 주어진 부반송파 간격에 대해 주파수 상에 잘 국소화된 파형을 사용하는 것을 고려할 수 있다. 5세대에서는 밀리미터파와 같이 높은 대역에서의 반송파 주파수 오프셋 및 위상 잡음에 대한 강인성을 위해 센티미터 대역 대비 4~6배 큰 부반송파 간격을 지원한다. 한편, Windowed OFDM(W-OFDM)[37], PS-OFDM 및 FBMC 기술들은 오버샘플링과 주파수 상에 잘 국소화된 파형을 적용하여 부반송파 간격의 증가 없이 반송파 간 간섭을 줄인다.

다중반송파 변복조 기반의 상향링크 전송에서는 복수의 단말기들이 서로 다른 또는 중첩된 시간 및 주파수 자원을 할당받아 다중접속을 한다. 서로 다른 시간 및 주파수 자원을 할당받는 경우라 하더라도, 기지국과 서로 다른 거리에 떨어져 있는 단말기들로부터 수신기에 도달하는 신호들의 도착 시간이 전파 지연에 의해 상이할 수 있다. 따라서 이를 일치시키기 위해 송신 타이밍을 조정시킬 수 있다. 송신 타이밍 조정을 생략하거나 송신 타이밍 조정 후에도 남아있는 사용자 간 심볼 타이밍 오프셋 그리고 사용자들이 독립적으로 수행하는 주파수 동기화 및 샘플링으로 인해 사용자 간 반송파 주파수 및 샘플링 클락 오프셋이 발생할 수 있다. 이로 인해 사용자 간 심볼 간 간섭과 사용자 간 주파수 간 간섭이 초래되고 결국 복호 성능을 열화시킬 수 있다. 사용자 간 서로 다른 시간 및 주파수 자원을 할당받는데 있어 복수의 연속적인 심볼(이하 부프레임으로 통칭) 내 복수의 연속적인 부반송파(이하 부밴드로 통칭)를 할당 단위로 사용하는 경우, 사용자 간 심볼 간 간섭 및 사용자 간

주파수 간 간섭은 할당 단위의 경계에서 영향력이 크므로, 부밴드 단위의 필터링을 통해 부밴드 경계의 부반송파 간 간섭을 완화시키는 Filtered OFDM(F-OFDM)[38] 및 Universal Filtered Multicarrier(UFMC)[39] 기술이 제안되었다.

상기에서 언급된 사용자 내/간 반송파 간 간섭 완화 파형 기술들의 채널 주파수 응답을 살펴보면 사이드 로브가 급격하게 감쇄되는 것이 특징이다. 따라서 사각 펄스 또는 롤-오프된 펄스를 사용하는 CP-OFDM 대비 보호 부반송파를 적게 사용하여 주파수 효율을 향상시킬 수 있다. 단, PS-OFDM 또는 F-OFDM의 경우에는 직교성이 훼손되긴 하지만 눈에 띄는 링크 성능 열화를 초래하지 않도록 잘 설계된 파형을 사용한다.

파형 설계에 있어 중요한 성능 요소 중 하나는 주파수 효율이라 할 수 있다. 주파수 효율은 심볼 간격 T 와 부반송파 간격 F 에 의해 좌우될 수 있다. 일반적으로 TF 는 1보다 크거나 같은 값을 가지고, 1에 가까울수록 높은 주파수 효율을 갖는다. Balian-Low 이론에 의하면, 복소수 상에 $TF=1$ 이면서 시간 및 주파수 상 모두에 잘 국소화돼 있고 직교성을 갖는 파형은 존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 한 예로, CP-OFDM의 경우, 임펄스 응답은 사각 펄스이므로 시간적으로 잘 국소화된 반면, 주파수 응답의 경우 sinc 펄스이므로 주파수 상에서는 국소화되어 있지 않다. FBMC에서는 Gaussian 펄스를 Isotropic Orthogonal Transform Algorithm(IOTA)를 통해 시간 및 주파수 모두에 대해 직교하는 펄스를 얻어 내고, 실수 상에서 $TF=2$ 인 경우에 대해 시간 및 주파수 상 모두에 잘 국소화돼 있다. $TF=2$ 에 의한 전송률 손실을 극복하기 위해 실수로 구성된 시간-주파수 격자에 오프셋을 갖는 허수로 구성된 시간-주파수 격자 상에 추가적으로 데이터를 전송하는 기법을 사용한다. FBMC는 복소수 데이터 심볼의 전송이 어려워 다중안테나 기술의 적용이 어렵고 오버샘플링된 펄스 사용에

의해 Transmission Time Interval(TTI)의 증가와 Time Division Duplexing(TDD)에서의 적용이 용이치 않은 단점이 있다. 한편, Balian-Low 이론에서의 $TF=1$ 조건 대신 $TF < 1$ 을 통해 비직교성을 허용하면서 시간 및 주파수 상 모두에 잘 국소화된 파형을 사용하는 비직교 다중 반송파 방식[40]도 제안되었다.

지금까지 소개한 파형 기술은 심볼 단위의 변복조가 가능하다. 최근에는 채널 도플러 확산에 강인성을 위해 주파수 축뿐 아니라 시간 축을 함께 고려한 Orthogonal Time Frequency Space(OTFS)[41] 변복조 방식이 제안되었다. 심볼 단위로 (I)FFT를 수행하는 대신, Discrete Symplectic 푸리에 변환을 통해 부반송파와 심볼 상에 함께 변복조를 수행하는 방식으로, 각 데이터 심볼을 사용하는 모든 부반송파 및 복수의 심볼에 스프레드 시켜 모든 데이터 심볼이 동일한 채널을 겪도록 한다. 이는 데이터 심볼들을 부반송파(또는 주파수 도메인) 및 심볼(또는 시간 도메인)로 구성되는 격자 대신, 지연 도메인 및 도플러 도메인으로 구성되는 격자에 다중화하는 방식으로 해석할 수 있으며, 전송하는 동안 채널 지연 및 도플러 확산 자체가 시변하지 않는다면 이들에 의한 성능 열화를 방지할 수 있다. 따라서, 초고속이동 환경에서 CP-OFDM의 대안 방식으로 고려될 수 있을 것으로 기대된다.

상기에서 소개한 바와 같이 5세대 이동통신에 이르기까지 표준에 채택된 파형 외에도 다양한 파형들이 연구되어 왔으나, 이들의 실제적인 적용에 있어 높은 PAPR, 높은 구현/계산 복잡도, 다중안테나 기술과 같이 타 기술의 확장 용이성 등에 의해 그 이용이 제한되거나 표준에 채택되지 않았다. 하지만, 시스템 집적도가 증가되어 기저대역의 처리 속도가 개선되고 아날로그/RF 소자의 가격이 저렴해짐에 따라, 다양한 환경에서 다양한 서비스 요구사항을 반영할 수 있으면서 앞에서 살펴본 바와 같이 다양한 원인에 의한 원신호 왜곡 및 간섭에 대해

강인성을 갖거나 이들을 근본적으로 제거할 수 있는 신파형 기술이 차후 이동통신 표준에 채택될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 지연/이동/구현 한계

1. 3GPP 지연감소 기술

3GPP 표준화 단체에서는 중단 간 지연을 감소하기 위해서 Rel-14부터 Rel-16에 이르기까지 무선규격을 논의하고 있다. 특히 Rel-16에서는 공장 자동화 시나리오, 전력 분배, 자율차량 조절 등을 주요 응용 분야로 선정하고, 지연뿐만 아니라 신뢰도에 대한 요구 조건을 만족하기 위해서 기술을 개발하고 표준화하고 있다.

가. 신호처리 지연 감소

물리계층에서의 지연을 직접적으로 감소하기 위해서, OFDM 심볼의 부반송파 간격이나 자원 할당 간격을 조절할 수 있다. 이는 더욱 짧은 전송시간 간격(short TTI)을 의미하여 물리계층에서의 지연을 감소할 수 있다. 예를 들어, OFDM 심볼의 부반송파의 간격이 15kHz인 경우에는 14개의 심볼이 1msec를 차지하지만, 부반송파의 간격을 60kHz로 변환하면 14개의 심볼이 1/4msec로 감소한다. NR 규격은 동작 주파수 대역에 따라서 지원하는 부반송파의 간격을 구분하고 있으며, 6GHz 미만의 대역에서 동작하는 경우, 15kHz, 30kHz, 60kHz로 데이터를 송수신할 수 있고, 6GHz 이상의 대역에서 동작하는 경우, 60kHz, 120kHz로 데이터를 송수신할 수 있다.

물리계층 절차에 걸리는 시간을 줄이기 위해서, 단말의 처리능력(capability)을 규격에서 정의하고 있다. 특정한 상황에서 단말이 처리하는 시간을 심볼의 개수로 정의하고 있으며, 기지국은 이에 따라서 최소한의 시간으로 절차를 수행할 수 있다. 또한 단말은 기지국으로부터

제어 정보를 더 자주 수신할 수 있도록, PDCCH를 복호하는 능력도 향상시킴으로써, 기지국이 모든 OFDM 심볼에서 PDCCH를 전송할 수 있는 등 동적으로 물리계층에 관여할 수 있다.

나. 무허가 전송

단말이 기지국으로부터 PDCCH를 매번 성공적으로 수신한다면 중단간 지연 시간을 상당히 줄일 수 있지만, 만일 PDCCH의 수신 성능이 낮은 경우에는 단말이 데이터를 송수신할 수 없다. 이러한 경우, 단말이 절차를 수행할 수 없으므로 중단 간 지연시간이 증가한다. 더욱이 상향링크의 경우에는 단말이 스케줄링을 요청하는 절차를 수행하기 때문에 하향링크보다 지연시간이 증가한다. NR 규격에 의하면, 기지국은 단말에게 자원할당을 미리 선언하고, 필요한 경우에는 별도의 제어 채널이 없더라도 하향링크 데이터 또는 상향링크 데이터를 전송할 수 있다. 공장자동화 등의 시나리오가 갖는 트래픽은 작은 크기의 패킷을 일정한 주기를 가지고 반복적으로 발생하는 특징을 갖기 때문에 PDCCH 등의 제어 정보를 생략할 수 있다. 또한, NR 규격은 수신품질을 높이고 자원의 효율성을 높이고자 데이터를 반복하여 전송하는 절차도 지원한다.

다. 다중 트래픽의 동적인 다중화

NR 규격에 의하면, 둘 이상의 품질을 지원하는 트래픽이 존재하고 이를 동적으로 지원할 수 있다. 예를 들어, 더 빠르게 지원해야 하는 트래픽을 일반적인 트래픽보다 더 우선시하여, 무선 자원의 일부 영역을 동적으로 사용한다. 이러한 경우, 일반적인 트래픽은 전송량이 감소할 여지가 있으며, 이를 최소화하기 위해서 NR 규격에서는 데이터를 전송블록보다 더 세분화하여 부호블록의 단위로써 스케줄링하거나 또는 무선 자원의 일부 영역들의 패턴을 시그널링함으로써 단말이 부호화/복호화

과정에서 해당 영역에서 전송하거나 수신한 데이터를 별도로 처리할 수 있다.

2. 이동 한계

5G 규격의 주요 요구사항 중 하나는 고속 이동체에서도 일정 수준의 전송률을 확보하는 것이다[42]. 고속 이동체 시나리오는 차량과 기지국 간 통신과 같은 일반적인 시나리오 외에도 최근 들어 언급되고 있는 하이퍼루프와 같은 초고속 이동체의 등장에 따라 더욱 중요한 요구사항이 되고 있다[43]. 이에 따라 고속 이동 환경에 따른 높은 도플러 효과의 영향하에서도 신뢰도 높은 서비스를 제공하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으나, 기존 OFDM 파형을 그대로 유지하는 한 5G의 주요 요구사항 중의 하나인 V2X 및 고속 열차 등과 같은 고속 이동체와 관련된 새로운 요구사항을 만족시키기가 어려울 것으로 예상된다.

예를 들어 5G Phase 2에 포함된 V2V 시나리오에서, 일반적으로 차량들은 고속으로 이동하면서 다른 차량으로 신호를 전송 또는 방송하고 수신 차량은 셀룰러 통신의 일반적인 HARQ 재전송 방식을 사용하는 것이 어려우므로, 한 번에 매우 신뢰도 높은 통신이 이루어져야 한다. 또한, 다른 예로, OFDM의 성능이 매우 떨어지는 500km/h의 이동 속도에서 매우 높은 전송 용량을 요구하는 고속철도 시나리오 또한 기존 OFDM의 한계가 될 것으로 예상된다.

기존의 OFDM은 CP를 이용하여 다중 경로에 따른 지연으로 인한 ISI 효과를 극복하지만, 도플러 효과의 경우는 일정 수준 이상의 도플러 효과로 인한 ICI에 의한 성능 열화는 피할 수 없게 된다. 고속 이동에 따른 ICI에 의한 기존 OFDM의 성능열화를 극복하기 위한 파형 중의 하나로 OTFS 파형이 2016년 3GPP 표준화 회의에서 소개되었다[44]. 이 방식은 기존의 1차원 무선 채널에 도플러 특성을 나타내는 두 번째 차원을 추가하여 채널

널 모델을 보완한 방식으로, 채널의 시간 및 주파수 변화에 비해 안정적이고 천천히 변하는 지연 및 도플러 변화를 관찰하여 보다 간결하게 채널을 표현할 수 있다는 장점이 있다. OTFS 변조는 정보 심볼을 지연-도플러 좌표계에서 매핑한 후 시간-주파수 좌표계로 변환하여 전송하는 방식으로, 다중 경로에 의한 시간 지연 및 높은 도플러 효과에 의한 채널 영향을 지연-도플러 좌표계에서 효과적으로 처리한다는 점이 특징이다.

OTFS 변조는 Symplectic 푸리에 변환이라고 하는 2차원 푸리에 변환을 이용하여 시변 다중 경로 채널을 지연과 도플러를 기저로 하는 채널로 변환하는 것을 기본으로 하는데, 수신단에서 역변환 과정과 등화 과정이 동시에 진행되어 구현 단계에서의 고속 처리가 가능하다. 또한 OTFS 변조는 기존 OFDM 시스템에 전처리 및 후처리 블록을 추가하는 방식으로 구현이 가능해서 기존 OFDM 기반 시스템과의 호환성도 기대할 수 있다[45].

3. 딥러닝을 활용한 구현 한계

일반적으로 성능을 최적화하기 위해 복잡한 알고리즘을 도입할수록 실제 구현이 어렵다. 예를 들어, 채널부호화에서 최적 복호 방식은 Maximum a Posteriori(MAP) 복호 방식이나, 부호어 길이가 길어질수록 지수적으로 복잡도가 증가하기 때문에 실제 통신시스템에 도입하기는 거의 불가능하였다. 따라서, 최적 성능에 근접하지만, 복잡도가 낮은 알고리즘이 통신시스템에 구현되어 왔다.

그러나, 딥러닝을 비롯한 기계학습 기술이 눈부신 발전을 거듭함에 따라 고도의 복잡도를 가지는 방식들을 기계학습을 활용하여 구현하기 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다[46]. 딥러닝 등 기계학습, 특히 지도학습은 입력에 대해 원하는 출력이 나오도록 하는 역할을 하므로, 한마디로 표현하면 함수 근사화라고 할 수 있다. 통신시스템 역시 입력에 대해 원하는 출력이 나오는

역할을 하기 때문에 딥러닝과 비슷한 역할을 한다고 할 수 있다. 통신시스템을 딥러닝을 구현하기 위한 접근은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 통신시스템은 입력이 잡음 등 다양한 채널의 영향을 통해 변형된 후 원래의 입력을 복구하는 과정으로 해석하여, 입력과 출력 중단 간을 autoencoder로 보는 것이다[47]. Autoencoder는 인공지능망을 활용하여 입력 x 에 대해 중간 계층에서 압축 등을 통해 최적의 코딩 방식을 학습하여 같은 출력 x 가 나오는 방식으로 통신시스템과 닮은 부분이 많다. 통신시스템을 중단 간 autoencoder로 보면, 채널 혹은 장치 특성 등에 의해 전송 도중 발생하는 비선형 변환을 학습을 통해 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 다른 하나는 통신시스템을 구성하는 각 요소 블록에 대해 딥러닝을 통해 구현하는 것이다. 예를 들어 채널부호화의 경우, 일반적으로 어려운 복호화 블록을 딥러닝을 적용할 수 있다[48].

딥러닝은 학습 단계에서는 많은 연산과 시간을 필요로 하나, 학습이 끝난 인공지능망을 실제 활용하는 단계에서는 간단한 행렬 연산만 수행하면 되기 때문에, 실시간으로 동작하는 통신시스템에 바로 적용 가능하다. 고도의 복잡도를 가지는 알고리즘을 실시간으로 통신시스템에 구현하는 것이 매우 어려웠으나, 딥러닝을 활용하면 그동안 구현이 어려웠던 부분들에 대한 극복이 가능할 것이다.

VI. 맺음말

본고에서는 이론, 용량, 지연, 접속, 이동속도, 구현 등 다양한 무선통신기술 한계를 짚어보았고, 한계를 극복하기 위한 다양한 무선통신기술의 시도와 동향을 살펴보았다.

무선통신의 혁신적인 발전을 가져온 핵심기술들은 기존 한계를 극복하는 과정에서 얻어진 결과로서 2G, 3G, 4G, 5G까지 이동통신의 세대별 진화를 가능하게 한 원

동력이었다. 이러한 무선통신기술의 발전은 궁극적으로는 한계 없는 무선통신 실현이라는 불가능하게 보이는 목표를 지향할 것으로 기대된다. 이러한 도전적인 목표는 무선통신기술의 새로운 도약의 기회가 될 것이다.

약어 정리

3GPP	3rd Generation Project Partnership
APSK	Amplitude & Phase Shift Keying
CDL/TDL	Cluster Delay Line/Tapped Delay Line
CP	Cyclic Prefix
eMBB	enhanced Mobile Broadband
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
ICI	Inter-Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIoT	Industrial Internet of Things
IMT	International Mobile Telecommunications
InP	Indium Phosphide
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Index
LO	Local Oscillator
LOS	Line of Sight
mMTC	massive Machine Type Communications
NLOS	Nonline of Sight
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OOK	On Off Keying
OTFS	Orthogonal. Time Frequency & Space
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PSK	Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
Rel-16	Release-16
SiGe	Silicon-Germanium
TTI	Transmission Time Interval
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
V2X	Vehicle to Everything

참고문헌

- [1] C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell Syst. Techn. J.*, vol. 27, no. 3, July 1948, pp. 379-423.
- [2] T.M. Cover and J. Wiley, *Elements of Information Theory*, 2nd Edition, Wiley Online Library, 2006.
- [3] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes. 1," *Proc. ICC-IEEE Int. Conf. Commun.*, Geneva, Switzerland, 1993, pp. 1064-1070.
- [4] S.Y. Chung et al., "On the Design of Low-Density Parity-Check Codes within 0.0045 dB of the Shannon Limit," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 5, no. 2, 2001, pp. 58-60.
- [5] E. Arıkan, "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 7, July 2009, pp. 3051-3073.
- [6] E. Telatar, "Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels," *Trans. Telecommun. Technol.*, vol. 10, no. 6, 1999, pp. 585-595.
- [7] L. Zheng and D.N.C. Tse, "Diversity and Multiplexing: a Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 5, May 2003, pp. 1073-1096.
- [8] A. El Gamal and Y.-H. Kim, *Network Information Theory*, Cambridge University Press: New York, USA, 2012.
- [9] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. S. Shamai, "The Capacity Region of the Gaussian Multiple-Input Multiple-Output Broadcast Channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 9, 2006, pp. 3936-3964.
- [10] R.H. Etkin, D.N.C. Tse, and H. Wang, "Gaussian Interference Channel Capacity to Within One Bit," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 54, no. 12, Dec. 2008, pp. 5534-5562.
- [11] V.R. Cadambe and S.A. Jafar, "Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 54, no. 8, Aug. 2008, pp. 3425-3441.
- [12] M. Tonouchi, "Cutting-Edge Terahertz Technology", *Nature Photon.*, vol. 1, no. 97, 2007, pp. 97-105.
- [13] P.U. Jepsen, D.G. Cooke, and M. Koch, "Terahertz Spectroscopy and Imaging-Modern Techniques and Applications," *Laser Photon., Rev.*, vol. 5, no. 1, 2011, pp. 124-166.
- [14] IEEE 802.15 TG3d 14/0304r16, "Applications Requirements Document," May 2015.
- [15] 3GPP TR 38.900, "Study on Channel Model for Frequency Spectrum above 6 GHz, V14.3.1," 2017.
- [16] IEEE Std 802.15.3d, "Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer," 2017
- [17] TERAPOD, available at <https://terapod-project.eu/>.
- [18] TRRANOVA, available at <https://ict-terranova.eu/>.
- [19] R. Piesiewicz et al., "Towards Short-Range Terahertz Communication Systems: Basic Considerations," *Int. Conf. Appl. Electromagn. Commun.*, Dubrovnik, Croatia, Oct. 12-14, pp. 1-5.
- [20] H. Hamada et al., "300-GHz, 100-Gb/s InP-HEMT Wireless Transceiver Using a 300-GHz Fundamental Mixer," *IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp.*, Philadelphia, PA, USA, June 2018, pp. 1480-1483.
- [21] P. Rodríguez-Vázquez et al., "A 65 Gbps QPSK One Meter Wireless Link Operating at a 225-255GHz Tunable Carrier in a SiGe HBT Technology," *IEEE Radio Wireless Symp.*, Anaheim, CA, USA, Jan. 2018, pp. 146-149
- [22] L. Breslau et al., "Web Caching and Zipf-Like Distributions: Evidence and Implications," *Proc. IEEE INFOCOM*, New York, USA, Mar. 1999, pp. 126-134.
- [23] C. Yang et al., "Analysis on Cache-Enabled Wireless Heterogeneous Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2016, pp. 131-145.
- [24] N. Golrezaei et al., "FemtoCaching: Wireless Video Content Delivery through Distributed Caching Helpers," *Proc. IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA, 2012, pp. 1107-1115.
- [25] N. Golrezaei et al., "Base-Station Assisted Device-to-Device Communications for High-Throughput Wireless Video Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 7, July 2014, pp. 3665-3676.
- [26] M.A. Maddah-Ali and U. Niesen, "Fundamental Limits of Caching," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 60, no. 5, May 2014, pp. 2856-2867.
- [27] M. Ji, G. Caire and A.F. Molisch, "Fundamental Limits of Caching in Wireless D2D Networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 62, no. 2, Feb. 2016, pp. 849-869.
- [28] K. Zhu et al., "Social-Aware Incentivized Caching for D2D Communications," *IEEE Access*, vol. 4, Nov. 2016, pp. 7685-7593.
- [29] J. Li et al., "On Social-Aware Content Caching for D2D-Enabled Cellular Networks with Matching Theory," ac-

- cepted to IEEE Internet Things J., 2018.
- [30] B. Bai et al., "Caching Based Socially-Aware D2D Communications in Wireless Content Delivery Networks: A Hypergraph Framework," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 4, Aug. 2016, pp. 74-81.
- [31] Z. Chen et al., "Cooperative Caching and Transmission Design in Cluster-Centric Small Cell Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 5, May 2017, pp. 3401-3415.
- [32] Z. Ding et al., "NOMA Assisted Wireless Caching: Strategies and Performance Analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, Oct. 2018, pp. 4854-4876.
- [33] 3GPP TS 36.211 v15.3.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation," Jan. 2019.
- [34] 3GPP TS 38.211 v15.4.0, "NR; Physical channels and modulation," Jan. 2019.
- [35] Z. Zhao et al., "Pulse shaped OFDM for Asynchronous Uplink Access," *Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2015, pp. 3-7.
- [36] B. Farhang-Boroujeny, "OFDM Versus Filter Bank Multicarrier," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, vol. 28, no. 3, May 2011, pp. 92-112.
- [37] Qualcomm Inc., "Waveform candidates," 3GPP TSG-RAN WG1 #84b, R1-162199, Apr. 2016.
- [38] J. Abdoli, M. Ja, and J. Ma, "Filtered OFDM: A New Waveform for Future Wireless Systems," *Proc. IEEE Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun.*, Stockholm, Sweden, June 2015, pp. 66-70.
- [39] V. Vakilian et al., "Universal-Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE," *IEEE Globecom Workshops*, Atlanta, GA, USA, Dec. 2013, pp. 223-228.
- [40] W. Kozek and A.F. Molisch, "Nonorthogonal Pulses for Multicarrier Communications in Doubly Dispersive Channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, 1998, pp. 1579-1589.
- [41] R. Hadani et al., "Orthogonal Time Frequency Space Modulation," *Proc. IEEE WCNC*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017, pp. 1-7.
- [42] R. El Hattachi, "A Deliverable by the NGMN Alliance," NGMN 5G Initiative White Paper, Feb. 17, 2015.
- [43] Hyperloop One, available at <https://hyperloopone.com>
- [44] R1-162930, "OTFS Modulation Waveform and Reference, Signals for New RAT," 3GPP, Apr. 2016.
- [45] Cohere Technologies, "Overview of OTFS Waveform for Next Generation RAT," 3GPP TSG RA WG1 Meeting #84, R1-162929, 2016.
- [46] 김근영, 명정호, 서지훈, "딥러닝을 활용한 무선 전송 및 접속 기술 동향," 전자통신동향분석, 제33권 제5호, 2018, pp. 13-23.
- [47] T.J. O'Shea and J. Hoydis, "An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer," *IEEE Trans. Cognitive Commun. Netw.*, vol. 3, no. 4, Dec. 2017, pp. 563-575.
- [48] E. Nachmani et al., "Deep Learning Methods for Improved Decoding of Linear Codes," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 12, no. 1, 2018, pp. 119-131.