초고주파대역 무선통신시스템 기술 동향

Wireless Communication System on Very High Frequency

정재호 (J.H. Jung, jhjung@etri.re.kr) 통신RF연구실 책임연구원
김명돈 (M.D. Kim, mdkim@etri.re.kr) 통신RF연구실 책임연구원
이정남 (J.N. Lee, jnlee77@etri.re.kr) 통신RF연구실 선임연구원
조영균 (Y.K. Cho, ykcho@etri.re.kr) 통신RF연구실 책임연구원
김광선 (K.S. Kim, gskim@etri.re.kr) 통신RF연구실 책임연구원
권헌국 (H.K. Kwon, hkkwon@etri.re.kr) 통신RF연구실 책임연구원
송영석 (Y.S. Song, ysong@etri.re.kr) 초고속무선백홀연구실 책임연구원
박형숙 (H.S. Park, hyeong@etri.re.kr) 초고속무선백홀연구실 책임연구원
최은영 (E.Y. Choi, eychoi@etri.re.kr) 초고속무선백홀연구실 책임연구원
김준식 (J.S. Kim, junsik@etri.re.kr) 초고속무선백홀연구실 책임연구원
김태중 (T.J. Kim, aisma@etri.re.kr) 셀룰러사물인터넷연구실 책임연구원

ABSTRACT

Future mobile services will require data transmission rates of 100 Gbps or higher due to the universalization of virtual and augmented reality devices. Therefore, THz technology, which uses an ultra-high frequency band of 200 GHz or higher, is expected to be a candidate for such high-quality services. This article describes the current status of THz radio propagation characteristics, device and system developments, and network requirements to identify the overall trends in THz wireless communication technology.

KEYWORDS Terahertz, Radio propagation, Lens horn antenna, FEC, Wireless backhaul

Ⅰ. 서론

향후 이동통신 서비스는 가상 및 증강 현실 기기의 보편화로 인해 이동통신망에서 100Gbps 이상의 데이터 전송이 요구될 것으로 예상되고, 이를 수용하기 위한 무선 전송 기술로 초광대역의 주파수 확보가 가능한 테라헤르츠 기술이 하나의 후보기술이 될 전망이다.

현재의 테라헤르츠 기술은 주로 비파괴 영상기기 등의 비 통신분야에 초점이 맞추어져 있으나 점

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340603
* This study was supported by Institute for Information & Communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) [no. 2019 2019-0-00218, Speciality Laboratory for Wireless Backhaul Communications based on Very High Frequency].

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2019 한국전자통신연구원

차 광 기반의 무선통신 시스템 기술개발을 시작으로 반도체 기반의 테라헤르츠 기술로까지 확대되고 있다.

5G 이동통신 기술이 상용화되고 6G 이동통신 기술에 대한 연구가 진행되는 이 시점에서 테라헤르츠 기술이 극복해야 할 과제는 수십 GHz의 광대역 주파수를 확보해야 하는 주파수 할당에서부터 광 혹은 반도체 기반의 소자 개발, 그리고 높은 직진성과 전파감쇠를 극복하는 무선 시스템이 개발될 것이다. 이러한 테라헤르츠 채널의 전파 특성은 고정 및 이동 접속 환경에서 백홀과 프론트홀을 구성하는 새로운 무선전송 방식과 네트워크 구성 방식을 요구하게 될 것이다.

본 고에서는 테라헤르츠 무선통신 시스템을 구현하기 위한 주파수 및 채널 특성과 안테나 및 소자 기술개발 동향, 그리고 무선 전송 방식과 네트워크 구성의 고려사항에 대해 소개한다.

Ⅱ. 초고주파 전파특성 기술동향

1. 채널 및 측정 시스템 동향

2015년 세계전파통신회의(WRC)에서는 미개척 주파수 대역에 해당하는 275~450GHz 대역을 이동(Land mobile) 및 고정 서비스(Fixed service)용으로 할당 가능한지 여부에 대해 WRC-19 연구의제(agenda item 1.15)로 채택하였으며, 그 이후 200GHz 이상 주파수 대역에 대한 전파특성과 무선통신용으로의 활용 가능성 여부에 관심이 높아졌다. 이에 2017년 ITU-R은 해당 주파수 대역에서 이동 및 고정 서비스를 위한 기술 및 활용에 관한 보고서(M.2417, F.2416)를 채택하였으며, 고정 서비스의 경우 주요 응용분야로서 무선 프론트홀과 백홀을, 이동 서비스의 경우는 키오스크(kiosk), 티켓 게이트, 부품 간 통신, 데이터 센터 무선통신 등으로 정의하였다. 또한 ITU-R WP 1A 그룹은 WRC-19 연구 의제에 따라 기존 수동 및 능동 업무들과의 공유 연구(sharing study)를 실시하고 2019년 ITU-R 보고서(SM.2450)를 채택하였다.

IEEE 802.15 그룹은 2008년 Terahertz Interest Group(IGthz)을 발족하고 무선통신을 위한 테라헤르츠 대역의 가용성에 대한 연구를 시작하였으며, 2014년 IEEE 802.15.3d Task group을 결성하여 275~325GHz 주파수 대역에서의 다양한 애플리케이션 및 채널 모델에 관한 연구를 실시한 바 있다[1]. 대표적인 응용분야로서 키오스크와 같은 초근접 통신(Close Proximity Peer-to-peer Communications)을 중심으로 연구를 실시하였다. 이의 관련 연구를 주도하고 있는 독일 TU Braunschweig 대학의 Thomas Kuerner 교수 연구팀은 최근 300GHz 채널측정용 장치와 레이 트레이싱 툴을 이용하여 데이터 센터 내 통신 환경과 실외의 경우 열차 주변 등 단거리 통신용 전파특성을 분석한 바 있다[2].

일본의 경우, NTT와 NICT는 2006년 120GHz 대역에서 광변조를 이용하여 10Gbps의 HD신호를 전송하는 시연한 바 있으며[3], 2009년 NTT와 오사카 대학은 300GHz 대역에서 포토닉 송신기를 이용하여 12.5Gbps 고속 무선전송 시스템의 성능을 발표하였다[4]. 또한 300GHz 대역의 전파특성 연구를 위해 2016년 NTT는 계측기를 이용, 실내 사무실 및 복도 LoS 환경(최대거리 22m)에서 경로손실 측정결과를 ITU-R WP3K 회의에서 발표한 바 있다[5].

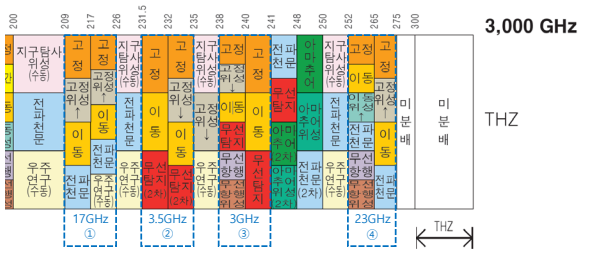
미국의 경우, 2018년 FCC는 95GHz 이상 주파수에 대해 새로운 통신 기술 및 서비스 개발을 장려하기 위해 개방하는 Spectrum Horizons 정책을 발표하였다. 테라헤르츠 대역의 전파특성 연구에 관해서는 Georgia Tech. 대학의 Alenka Zajic 교수 연구팀

이 300GHz 대역에서 반도체 칩 간 단거리 통신 응용분야를 위한 전파특성을 분석한 사례가 있으며 [6], 최근 뉴욕대학교의 Rappaport 교수 연구팀은 140GHz 대역에서 실내 환경에서의 채널측정 결과를 발표하였다[7].

최근 전파전파(Radio Propagation) 연구 업무를 담당하는 ITU-R SG3 연구그룹에서는 2019년 단거리 실내 및 실외 전파모델과 관련한 연구 의제 Q.211을 개정하고 향후 주파수 연구 범위를 기존 100GHz에서 최대 450GHz까지 확장하기로 의결하였다.

지금까지 200GHz 이상 초고주파 대역의 경우, RF 부품이 매우 고가이며 수급이 어려워 전파특성 측정용 장치의 구성 및 송신 전력 확보가 용이치 않은 관계로 단거리 위주로 전파특성 연구결과가 발표되고 있으나, 향후 무선백홀 등 응용분야를 고려하여 장거리 통신을 위한 전파특성 연구결과가 발표될 것으로 예상된다.

국내의 경우, ETRI는 2009년 전파방송원천기술개발사업의 일환으로 테라헤르츠 대역 무선전송 기술에 관한 선행원천연구를 수행한 바 있으며, 2010년 240GHz와 300GHz 대역에서 1.5Gbps 비디오 전송시스템을 시연한 바 있다. 또한 한국해양대에서 2018년 광 기반 THz 펄스 전송 시스템을 이용하여 실외 대기 및 가스 센싱을 위해 최장 910m까지의 전송을 연구한 사례가 있다 [8]. 테라헤르츠 대역에 관한 연구는 그동안 전반적으로 이미지 및 물성 분석에 목표를 둔 포토닉(photonic) 기반의 분광 시스템 등에 관한 연구가 주류를 이루었으며, 이동업무를 위한 부품 소재 및 시스템 등에 관한 연구개발은 거의 진행되지 않은 실정이다. 일부 테라헤르츠 대역의 전파특성 연구는 2018년부터 ETRI와 국립전파연구원에서 진행 중에 있다.



출처 Reprinted with permission from KCA 전파누리, "대한민국 주파수 분배표," 2019.

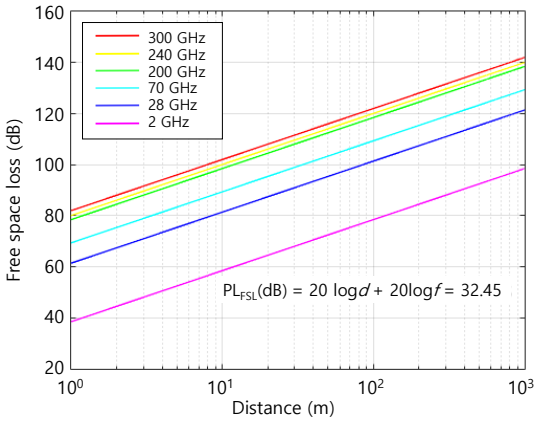
그림 1 국내 주파수 분배현황 및 활용가능대역 조사

2. 주파수 분배 및 전파특성

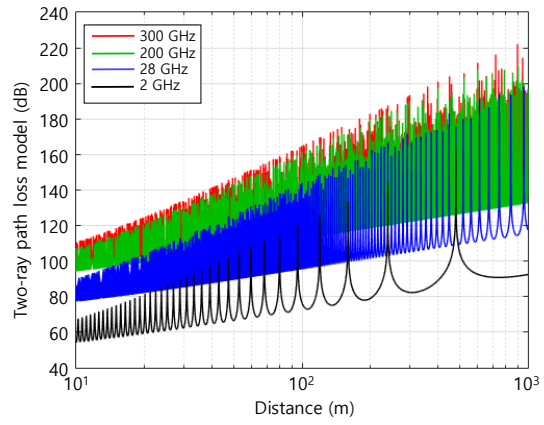
200GHz 이상 테라헤르츠 주파수 대역에서 현재 국내 주파수 분배현황을 기준으로 200~300GHz 대역 중 이동 및 고정 서비스로 할당되어 있어 무선백홀 등 응용서비스로 활용 가능한 주파수 대역을 조사하였다. 그림 1과 같이 국내에서 전파발사 금지구역, 우주 지상업무 등을 위해 기 할당된 대역을 제외하면 ① 209~226GHz, ② 231.5~235GHz, ③ 238~241GHz, ④ 252~275GHz 구역에서 총 46.5GHz의 대역폭을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그 외 275GHz 이상 대역의 경우 현재까지는 국내외 미할당 분배된 상태에 있다.

그러나 향후 200GHz 이상 테라헤르츠 주파수 대역을 이동 및 고정서비스 등 이동업무로 활용하기 위해서는 해당 주파수 대역에서의 전파감쇠를 극복할 수 있는 기술개발 연구가 필요할 것으로 보인다. 이는 기존 이동업무용으로 활용한 주파수 대역(100GHz 이하)에 비해 매우 심각한 수준이기 때문이다.

그림 2는 200~300GHz 대역의 자유공간손실(FSL)과 일반도로 LoS 환경에서의 전파모델(two-ray model 가정)을 시뮬레이션을 통해 비교 고찰하였다.



(a)



(b)

그림 2 주파수 대역별 이론적 전파감쇠 시뮬레이션:
(a) 주파수 대역별 자유공간손실 추정결과와
(b) 주파수 대역별 Two-ray model 전파감쇠 결과

자유공간손실의 경우, 기존 5G 주파수 대역인 28GHz에 비해 200GHz 대역에서 약 17dB의 추가적인 손실이 존재함을 확인할 수 있다. Two-ray model의 경우, 송신과 수신점의 거리가 멀어질수록 주파수 대역별 최대 70dB의 진폭오차가 발생할 수 있으며, 저주파 대역에 비해 200GHz 이상 초고주파 대역의 경우 상대적으로 짧은 파장(λ)에 의해 지면으로부터 발생하는 경로신호와 직접수신 신호와의 위상차로 상호보합 및 상쇄되는 거리간격이 매우 조밀함을 고찰할 수 있다. 결론적으로

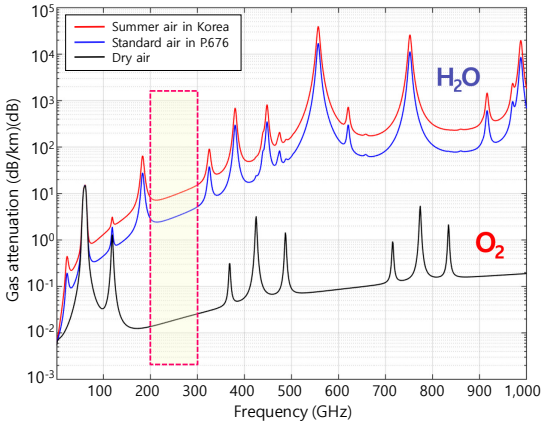


그림 3 TU-R 권고 P.676-11 표준 및 국내 기후 환경에서의 주파수 대역별 대기감쇠 추정치

200GHz 이상 초고주파 대역의 경우, 도로환경에서 수신점이 도로상에 위치할 경우 짧은 거리간격으로 수신전력 차이가 매우 클 것으로 예측된다.

일반적으로 200GHz 이상 테라헤르츠의 전파는 대기에 존재하는 산소(O_2)와 수증기(H_2O)에 의해 주로 흡수되어 특정 주파수 대역에서 감쇠량이 매우 큰 것으로 알려져 있다. ITU-R 권고 P.676-11[9]의 대기감쇠 모델에 따르면 지구의 평균 대기상태(Standard air condition)인 대기압 1,013hPa, 온도 15℃, 수증기 밀도 7.5g/m^{3}에서 주파수 대역별 산소 및 수증기에 의한 감쇠(dB/km)를 추정할 수 있다. 200GHz 이상 대역에서의 대기감쇠는 산소와 수증기가 결합되어 저주파 대역에 비해 주파수별 매우 큰 격차의 감쇠가 발생함을 확인할 수 있다.

ITU-R 권고 P.676-11 대기감쇠 모델을 이용하여 국내 기후 환경을 고려한 주파수 대역별 감쇠 정도를 고찰하였다. 1981년부터 2010년까지의 국내 73개 관측지점에서의 기상청 데이터를 기반으로 해면기압, 평균기온 및 상대습도에 대한 월별평균값을 산출한 결과 우리나라의 경우 8월의 수증

표 1 주파수 대역별 대기감쇠 추정결과

주파수(GHz)	대기감쇠(dB/km)				
	209~226	238~248	252~265	265~275	200~300
P.676 표준	2.5	2.8~3.0	3.3~3.6	3.6~3.9	2.5~3.9
국내 8월 기준	7.2~7.7	3.7~9.1	9.4~10.6	10.6~11.5	7.2~11.5

기 밀도가 18.3g/m^3, 평균기압이 1,008.6hPa, 평균기온 24.9℃로 수증기의 감쇠가 가장 클 것으로 예상된다. 이에 ITU-R P.676에서 정의한 평균 감쇠량과 국내 기후를 고려한 주파수 대역별 대기 감쇠량을 그림 3과 같이 비교하였다.

그 결과, 표 1에서와 같이 200~300GHz 대역에서 국내의 경우 평균 7~12dB/km의 대기감쇠를 고려해야 하며, 이는 ITU-R P.676 표준의 평균에 비해 최대 약 5~7dB의 감쇠 차이가 있음을 확인할 수 있다. 275GHz 이상 대역의 경우는 일부 325GHz, 380GHz 등에서 약 100dB/km 이상의 높은 감쇠를 보인다.

200GHz 이상 테라헤르츠 주파수 대역을 실외 이동업무로 활용하기 위해 추가적으로 고려해야 할 부분은 강우에 의한 전파감쇠이다. 일반적으로 송신과 수신 간의 가시영역에서의 이론적 경로손실은 다음 수식과 산정될 수 있다.

$$L_{LoS}[dB] = L_0 + 10n\log_{10}\frac{d}{d_0} + L_{gas} + L_{rain}$$

이때, L_{gas}는 대기감쇠량, L_{rain}는 강우에 의한 감쇠량, 그리고 L_0는 기준 거리 d_0에서의 경로손실을 나타낸다.

ITU-R 권고 P.837-7[10]에 따르면 200~300 GHz 대역에서의 강우감쇠는 강우량에 따라 매우 큰 차이를 보이며, 최소 0.7dB/km@0.25mm/hr 에서 50dB/km@200mm/hr에 달한다. 따라서 옥외 환경에서 무선백홀 등 응용 시나리오를 고려할 때 기후 및 강우량에 따른 무선 링크상에서의 전파 손실을 극복해야 할 것으로 예상된다.

III. 초고주파 시스템 기술동향

1. 초고주파 안테나 기술

테라헤르츠 안테나는 응용 분야에 따라 그 종류를 달리한다. 비접촉, 비파괴 및 물질분석 시스템에는 비교적 안테나 이득이 높지 않은 패치 및 혼 안테나를 사용하고 고주파 광대역 무선통신 시스템에는 고이득 배열 안테나(패치 형태, 혼 형태) 및 반사판 안테나(카세그레인, 파라볼릭)를 사용한다. 초창기의 테라헤르츠 안테나는 비교적 송수신 거리가 짧은 광 기반의 광소자를 사용한 테라헤르츠파 발생 및 변조 시스템에 사용되었다. 그림 4는 포토 다이오드를 이용한 테라헤르츠 통신에 주로

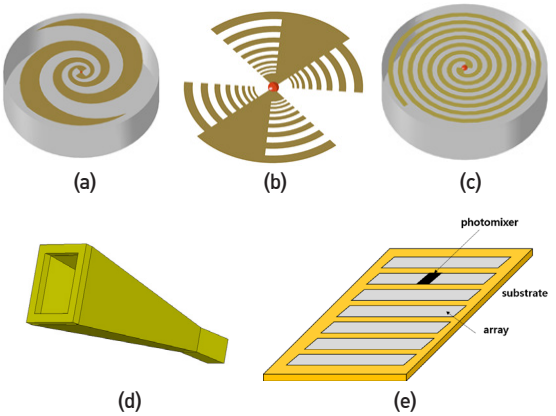


그림 4 포토다이오드 기반 테라헤르츠 시스템의 다양한 안테나: (a) log-spiral, (b) log-periodic, (c) spiral antenna, (d) horn antenna, (e) printed yagi antenna

사용되는 안테나로서, 동작 특성에 따라 광대역 안테나와 지향성 안테나로 구분되어 사용된다. 짧은 거리에 넓은 주파수 범위를 필요로 하는 경우 패치 형태의 대표적 안테나인 log-spiral, log-periodic, spiral antenna를 사용하는데, 대역폭이 넓은 대신 안테나가 이득이 작다는 단점이 있다. 긴 거리와 좁은 빔 폭이 요구되는 경우 혼 안테나, 야기 안테나, 배열 패치 안테나가 사용되는데, 포토 다이오드와의 집적이 까다롭다는 단점이 있다.

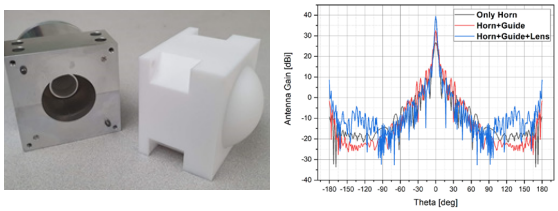
포토 다이오드 기반의 안테나 전체 효율을 결정하는 것은 포토 믹서와 안테나의 임피던스 정합 그리고 안테나 방사 효율이다. 포토 믹서와 안테나 간 임피던스 차이로 인한 부정합에 의해 안테나 효율이 감소하는데, 이는 높은 임피던스를 갖도록 안테나의 구조를 변경하거나, 포토 믹서와 안테나 간 공액 정합을 수행하여 해결할 수 있다. 또한 입력 전력이 공기 중이 아닌 유전체 방향으로 방사하여 효율 감소가 생기는데, 이는 유전체 기판과 유전율이 거의 같은 유전체 렌즈를 부착하여 내부 전반사를 제거한 후 한 방향으로 빔을 집중시키거나 0.1λ 이하의 얇은 기판을 사용하여 기판의 영향을 최소화하는 방법으로 해결할 수 있다.

현재까지 많은 연구가 진행되고 있는 포토 다이오드 기반의 테리헤르츠 시스템용 안테나에 비해 장거리, 고용량을 목적으로 하는 테라헤르츠 안테나 연구는 다소 미흡하다. 5G 이후에 등장할 6G 및 무선백홀(밀집 공간, 도로 환경)에서는 100Gbps에서 1Tbps의 채널 용량이 요구되고 수 km의 거리에서 송수신이 가능해야 하므로 기존의 낮은 이득 테라헤르츠 안테나는 사용이 불가능하다.

2013년에 독일의 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)에서는 넓은 강을 사이에 두고 무선 링크의 접근이 쉽지 않은 지역을 237.5GHz의 주파수 대역에서 송수신하는 실험을 진행하였다[11]. 광 기반의 송신기와 전자 기반의 수신기를 사용하였으며 송수신 안테나는 렌즈 혼 안테나를 사용하였다. 안테나 이득은 송수신 혼 안테나 및 렌즈를 포함하여 86dBi이며 20m 거리에서 최대 데이터 속도 100Gbps를 달성하였다. 송수신 안테나를 이득이 약 50dBi 이상인 카세그레인 안테나를 사용하면 약 1km 이상 거리에서 송수신이 가능할 것으로 예상하였다.

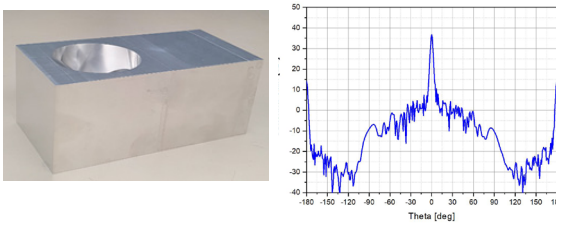
100GHz 이상 대역에서 기존의 단일 패치 및 혼 안테나는 낮은 이득 때문에 사용할 수 없으므로 빔 형성 기술이 필요한 배열 패치 안테나, 배열 혼 안테나 및 반사판 안테나를 사용해야 한다. 그러나 배열 패치 안테나는 유전체 손실이 크기 때문에 고성능 유전체 기판 제조 기술이 필요하고 배열 혼 안테나는 송수신 칩과의 집적이 어렵고 빔 형성의 문제점이 존재한다. 또한, 반사판 안테나(카세그레인, 파라볼릭)는 크기가 매우 큰 단점이 있다. 따라서 혼 안테나에 유전체 렌즈를 추가하여 이득을 높이거나 반사판 안테나의 크기를 줄이면서도 고이득을 획득할 수 있는 안테나 기술이 필요하다.

그림 5는 일반적인 코니컬 혼 안테나 주위에 코니컬 혼 안테나 2배 크기의 금속 가이드를 추가하여 이득을 높이고 개구면 최종단에 유전체 렌즈를 부착하여 고이득을 획득한 렌즈 혼 안테나이다



출처 J.-N. Lee et al., "High Gain Dielectric Lens horn Antenna with the Metal Guide for Sub-Terahertz Communication Systems," ETRI Journal (Submitted).

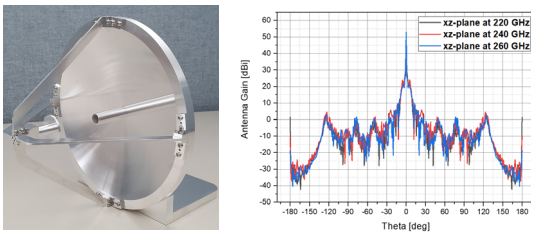
그림 5 금속가이드를 적용한 테라헤르츠 렌즈 혼 안테나: (a) 안테나 구조, (b) 안테나 이득



(a) (b)

출처 이정남 외, "테라헤르츠 시스템용 유전체 렌즈 혼 반사판 안테나 설계," 2019년 한국전자파학회 하계종합학술대회 발표자료, 2019. 08.

그림 6 테라헤르츠 혼 반사판 안테나: (a) 안테나 구조, (b) 안테나 이득



(a) (b)

출처 이정남 외, "테라헤르츠 시스템용 소형 카세그레인 안테나 설계," 2019년 한국통신학회 하계종합학술회 발표자료, 2019. 06.

그림 7 테라헤르츠 카세그레인 안테나: (a) 안테나 구조, (b) 안테나 이득

[12]. 일반적인 코니컬 혼 안테나의 이득은 중심주파수 240GHz에서 27dBi이고 금속 가이드를 적용하였을 경우 32.5dBi로 이득이 증가하며, 최종적으로 렌즈를 적용하였을 경우 40dBi의 이득을 갖는다. 제시된 렌즈 혼 안테나를 송수신 안테나로 사용할 경우 약 80dBi의 총 이득을 획득할 수 있다.

그림 6은 코니컬 혼 안테나와 파라볼릭 반사판을 결합한 혼 반사판 안테나이다. 도파관 급전으로 여기된 신호가 반사판에 의해 반사된 후 혼 개구면으로 방사되는 구조로써 혼 안테나의 이득을 높이는 대표적인 안테나이다. 대표적인 반사파 안테나인 카세그레인 및 파라볼릭 안테나보다 이득은 낮지만 크기가 작은 장점이 있으며, 그림 6(b)에서 보는 바와 같이, 중심주파수 240GHz에서 약 36dBi의 높은 이득 특성을 획득하였다[13].

그림 7은 테라헤르츠 대역 카세그레인 안테나 구조를 보여준다. 기존의 카세그레인 안테나는 반사판 직경이 매우 크다는 단점이 존재하지만 동작 주파수 대역이 100GHz 이상으로 높아짐에 따라 안테나 크기는 파장에 비례하여 작게 구현이 가능하다. 그림 7(a) 카세그레인 안테나의 직경은 18cm로 통상적인 카세그레인 안테나보다 매우 작게 구현하였다. 그림 7(b)에서 보는 바와 같이, 중심주파수 240GHz에서 안테나 이득은 약 52dBi로 매우 높은 것을 확인할 수 있다[14].

무선통신 주파수 대역은 기술의 발전에 따라 점점 높아지고 고출력, 장거리 전송에 대한 요구가 증대되고 있어 테라헤르츠 대역에서의 장거리 전송이 가능한 고이득 안테나에 대한 연구가 필수적이다. 향후 고성능 유전체 기판 제조 기술, 배열 혼 안테나 칩 집적화 기술 및 빔 포밍 기술에 대한 연구가 필요하다.

2. 초고주파 송수신기 기술

전통적인 광 기반 테라헤르츠 송수신기의 연구와 더불어 최근에는 나노급 반도체 기술의 발달로 전자소자를 기반으로 하는 테라헤르츠 송수신기의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 다양한 응용분야에 적용하기 위한 기술들이 제안되고 있지만 무선통신에 활용되기 위한 테라헤르츠 송수신기의 구조 및 핵심 전송기술에 대한 개발 수준은 매우 미흡한 실정이다.

일본의 히로시마 대학에서는 IEEE 802.15.3d 표준에 맞추어 단일 칩 형태의 테라헤르츠 송수신기를 개발하였다[15]. CMOS 공정의 낮은 f_{max} 문제를 해결하기 위해 송신기는 스퀘어 상향 변환기를 사

용하였으며 수신기는 저잡음 하향변환기 및 기저대역 증폭기를 적용하여 직접변환 수신기 형태로 제작하였다. 16QAM 방식으로 2.16GHz 대역폭의 12개 다중 채널 신호를 통해 80Gbps의 데이터 전송률을 달성하였다. 또한, NTT에서는 높은 변환이득과 격리도가 높은 상하향 변환기를 개발하여 300GHz의 중심주파수에서 16QAM 방식의 25GHz 대역폭 신호로 100Gbps 데이터 전송률을 달성하였다[16]. 이때의 전송거리는 2.2m이다. 개발된 송수신 모듈은 80nm InP-HEMT 공정을 통해 자체 개발한 전력증폭기, 저잡음 증폭기, LO 증폭기, 그리고 다양한 고주파 필터를 적용하였다.

독일의 부퍼탈 대학에서는 225~255GHz 대역에서 가변 중심 주파수를 가지는 송수신기 모듈을 이중 칩 형태로 개발하였다[17]. 측정 거리에 따라 EVM 성능이 유지되는 특성을 보여 링크가 신호 대 잡음비에 의해 제한되지 않는다는 것을 확인하였으며, 이를 통해 테라헤르츠가 장거리 통신에 적용될 수 있음을 증명하였다. QPSK 방식으로 15GHz 대역폭 신호를 통해 1m 거리에서 65Gbps의 데이터 전송률을 달성하였다.

미국의 버클리 대학에서는 체배기와 온칩 안테나를 이용한 공간 전력 합성 방식을 적용하여 반도체 소자의 차단 주파수를 뛰어넘는 OOK 방식의 송수신기를 CMOS 단일 칩 형태로 개발하였다[18]. 제작된 칩은 260GHz의 중심주파수에서 5dBm의 EIRP 성능을 보이며 4cm 거리에서 10Gbps의 데이터 전송률을 달성하였다.

한국의 고려대학교에서는 1.1~7.7GHz의 중간주파수 대역을 이용하는 헤테로다인 방식의 단일 칩 송수신기를 개발하였다[19]. 고주파 증폭기, 믹서, 그리고 LO 등의 기능블록을 포함하는 송수신기 칩은 300GHz 중심주파수에서 18GHz 이상의 대역폭을 가지며, 25dB 수준의 변환이득을 획득하였다.

표 2 테라헤르츠 송수신 시스템 주요 성능 비교

참고문헌	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]
중심주파수 (GHz)	265.68	240	287	298	298
신호대역폭 (GHz)	2.16× 12개	15	25	15	18
변조방식	16QAM	QPSK	16QAM	OOK	–
전송률(Gbps)	80	65	100	6	–
전송거리(cm)	3	100	222	4	–

3. 초고주파 부품 기술

5G 이동통신 기술, 차량용 레이다, 군수응용 등에서 사용하는 주파수 영역이 밀리미터파로 확대됨에 따라서 100GHz 이하의 RF 부품기술은 상당한 발전을 이루었지만, 100GHz 이상의 테라헤르츠 대역은 센서나 이미징과 같은 초근거리 무선영역에 대한 연구가 주로 이루어졌고 무선통신용 RF 기술은 아직 성숙되어 있지 않다.

테라헤르츠 대역에서는 기본적으로 대용량 무선전송을 위해 수십 GHz 이상의 대역폭을 사용하므로 FDD보다는 TDD 방식이 유리하고, 그림 8과 같이 필터의 사용이 적은 직접 변환 구조를 사용하는 것을 고려할 수 있다. 이 구조에서는 안정적인 LO 주파수를 사용하기 위해 낮은 주파수에서 PLL을 사용하고 필요한 주파수로 높이기 위한 체배기가 적용되었고, IQ 변조 기능을 가지는 서브 하모닉 믹서를 지나 PA와 LNA에 연결된다. TDD 방식을 위해 스위치가 필요하지만 테라헤르츠 대역의 안테나는 크기가 작으므로 송수신 안테나를 분리하는 방법도 검토해 볼 필요가 있다. 시스템 구조는 다른 주파수 대역과 크게 다르지 않지만 테라헤르츠 대역을 위해서는 고려되어야 하는 부분이 많

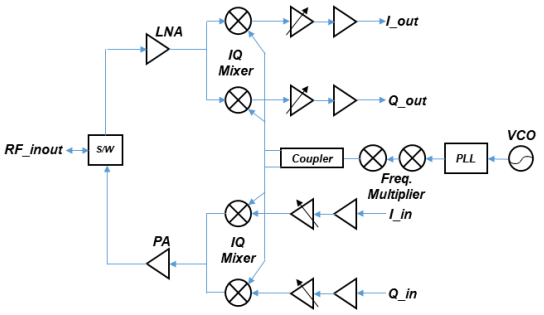


그림 8 직접변환 방식의 테라헤르츠 통신용 송수신

다. 우선 기존과 달리 테라헤르츠 대역은 높은 LO 주파수를 형성하므로 주파수 체배기가 필수적이다. 주파수 체배기는 입력 대비 N배의 출력 주파수를 갖게 하는 회로이고 이것은 위상잡음 특성을 $20Log_{10}N$ 만큼 증가시키므로 위상잡음에 의한 특성 열화 문제를 해결해야 한다. 그리고 테라헤르츠 대역에서 높은 변환 손실과 충분한 이득을 얻기 힘들기 때문에 충분한 수신 Dynamic Range를 확보하는 것도 중요한 이슈이다. 또한 빔 형성을 위한 다중 채널 구성 및 여러 공정 기술의 칩을 집적하기 위한 칩들 간의 저손실 인터페이스도 중요하다.

현재 상용부품으로는 도파관 인터페이스를 가지는 수동소자들 위주로 출시되어 있고 증폭기의 경우 몇몇 회사에서만 출시되고 있다. 이러한 상용부품의 사용이 용이하지 않아 시스템 특성 시험을 위해 상용부품을 이용한 구성이 매우 제한적이어서 직접 부품을 개발하여 시스템을 구성하는 것이 대부분이다.

테라헤르츠 대역에서 300GHz 대역 부근을, 전자방식 회로기술과 및 광 기반 회로 기술을 비교하여 상대적으로 송수신 해결 방법이 존재하지 않는 테라헤르츠-갭(THz-Gap)이라고 한다. 현재 이를 극복하기 위해서 전자회로 공정기술의 개발, 인공재료, 메타 물질과 같은 새로운 재료 연구, 테라헤르츠파의 새로운 광 기반 기술까지 이러한 테라헤르츠-갭을 채우는 방법을 계속 찾고 있다.

표 3 테라헤르츠 대역 Front-End 모듈 기술 비교

방식	기술	f_{max}	Front-End 특성	
			P_{out}	Noise Figure
Compound Semiconductor	InP HEMT/ HBT	〉1.5THz	-2dBm @850GHz	12.7dB @850GHz
	GaN HEMT	〉230GHz	33dBm @100GHz	-
	GaAs SBD	〉3THz(f_T)	-14dBm @2THz	14dB @2THz
Silicon	SiGe HBT	〉700GHz	9.6dBm @215GHz	11dB @245GHz
	Si FET	〉450GHz	4.6dBm @210GHz	9dB @200GHz

출처 J.F. O'Hara et al., "A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications," Technol., vol. 7, no. 2, 2019, CC BY 2.0.

초기에는 테라헤르츠 주파수 대역에서 광 기반 회로 기술이 주로 사용되었으나 포토 믹서 기반 장치는 레이저 안정화 및 실시간 복조를 위해 송신기와 수신기 간의 동기화가 필요하고 전체 시스템은 크기 면에서 여전히 단말 장치에 적합하지 않는 단점이 있으며 실제 링크 시험에서도 전자식 테라헤르츠 수신기를 사용한다.

전자방식 회로 기술 중 화합물 반도체 방식은 최대 발진 주파수인 f_{max}가 1THz 정도까지 발전하였고[20], 실리콘 기반 방식도 700GHz 정도까지 가능하다. 아직 충분하지는 않지만 300GHz 이하의 대역에서는 이득을 가지는 회로의 구성이 가능하고 믹서나 체배기와 같은 수동 회로 구성은 더 높은 대역까지 구현이 가능하다. 하지만 테라 헤르츠 대역의 경우 많은 수의 회로가 집적되어야 하기 때문에 전력 효율을 높이기 위한 기술 개발이 절실히 필요하다.

또한 이동통신이 아닌 고정 점 링크의 경우에는

전자식과 광 기반 기술이 접목된 하이브리드 광전자 접근 방식이 효과적인 방법일 수 있다.

테라헤르츠 주파수 대역에서는 높은 자유공간 손실의 극복과 빔 간 간섭을 피하기 위해서 빔 형성은 반드시 필요한 기술이다. 낮은 출력전력으로 인해 상대적으로 높은 이득을 얻기 위해서 더 많은 수의 안테나 소자가 필요한데, 테라헤르츠 주파수 대역을 사용하는 유럽의 연구 과제인 Terranova에서는 송신은 하이브리드 빔 형성 방식을, 수신은 디지털 빔 형성 방식을 제안하였다. 하이브리드 빔 형성은 안테나 수보다 적은 RF 체인을 가지므로 복잡도를 낮출 수 있고 수신의 경우 빠르고 정확한 빔 추적 및 보정을 위해서 디지털 방식이 유리하다. 하지만 광대역 신호를 사용하는 테라헤르츠의 경우 수신 신호처리를 위한 부담이 크고 송수신 보정 방법이 필요하므로 통신 환경에 따른 빔 스위칭 방식이나 다른 빔 형성 기술의 조합을 고려해야 한다.

Ⅳ. 초고주파 전송방식 기술동향

1. 초고주파 무선전송 방식

테라헤르츠 주파수 대역을 사용하여 무선전송을 실현한 초기의 무선 전송시스템들은 간단한 변조방식으로 구현되었다. Single Carrier(SC)를 사용하여 BPSK처럼 심벌당 1bit를 전송하는 OOK나 QPSK, 16QAM으로 2bit, 4bit를 전송하는 방식이 주로 사용되었다.

IEEE에서는 252~325GHz 대역에서 근거리용 고속 P2P 링크를 위한 표준 규격 802.15.3d를 2017년에 완성하였다. 64QAM까지 지원하는 THz-SC와 THz-OOK의 두 가지 물리 계층 전송모드가 정의되어 있으며, 2.16GHz부터 61.9GHz까지의 8개 대역폭이 정의되어 최대 100Gbps로 전송 가능하다. 핀란드에서는 Oulu대를 중심으로 802.15.3d를 기본으로 하는 6G 연구 프로그램 6Genesis를 2018년 4월에 시작하였다.

테라헤르츠 대역에서 다양한 무선전송 서비스를 목적으로 하는 변복조 방식과 MIMO 기술 등의 전송방식 연구는 3GPP 5G New Radio(NR) 규격을 개발하기 위해 검토되었던 기술들에서 부터 출발할 가능성이 크다. NR을 위해 검토되었던 변조 방식은 OFDM, 변형 OFDM 방식들, FBMC, SC-FDMA 등이 있다. NR의 hybrid 방식 빔 형성 및 이를 운용하는 빔 관리 및 MIMO 기술은 테라헤르츠의 주요 전송기술로 연구될 것으로 예상된다.

테라헤르츠에서 대역에서의 무선채널 환경은 LoS가 우세할 가능성이 높다고 예상된다. LoS-MIMO는 LoS 환경에서 안테나 원소 간 간격과 안테나 간 거리가 특정 조건을 만족하면 직교하는 MIMO 채널이 생성되어 주파수 효율이 높아지는 원리를 이용하는 기술로 초고주파에서 성공적으로 사용되고 있다. Ericsson은 2019년 5월에 80GHz 대역 1.5km 거리의 고정 무선백홀 시스템에서 2.5GHz의 대역폭으로 8개의 스트림을 전송하는 LoS-MIMO 시스템으로 100Gbps 이상의 속도를 시연하였다[21].

최근 전자기파의 angular momentum을 새로운 자유도로 인식하여 주파수 효율을 높이는 orbital angular momentum(OAM) 다중화 방식이 초고주파 대역의 새로운 전송방식으로 떠오르고 있다[22]. 전자기파의 OAM은 $e^{js\phi}$으로 특정되며, s는 정수이고 ϕ는 azimuth angle로 무한대의 state가 가능하여 이론적으로는 무한 개의 데이터 스트림을 보낼 수 있다. 일본의 NTT가 2018년 5월 OAM 다중화 기술을 활용하여 100Gbps 무선전송 실험에 성공했는데, 28GHz 대역을 활용하여 10m 거리에서

7.2~10.8Gbps의 데이터 신호 11개를 동시에 처리하는 것으로 합계 100Gbps의 무선 전송을 실현하였다. NEC는 2018년 12월에 80GHz 대역의 40m 거리에서 8개의 모드를 가지는 OAM 다중화 전송을 사용하여 7.4Gbps를 성공적으로 전송하였다[23].

LoS-MIMO와 OAM 기술은 LoS 환경에서 우수한 성능을 보여주므로 LoS 환경이 우세할 것으로 예상되는 테라헤르츠 대역에서 주요 전송기술로 연구될 것으로 예상된다.

2018년부터 시작된 BRAVE 프로젝트는 90~200GHz 대역에서 Tbps급 전송속도를 지원하기 위한 새로운 변복조 방식을 찾고자 시작되었으며, 해당 스펙트럼에서 realistic 한 위상 잡음 모델을 제시하고, 위상잡음이 존재할 때 최적의 QAM 복조 방식에 대한 연구를 진행 중에 있다[24]. RF impairments 요소는 무선 변복조 방식에 따라 수신 신호에 미치는 영향 및 보상기술이 다를 수 있으므로 테라헤르츠 대역에 적합한 무선변복조 방식 선정에 중요한 메트릭이 될 것이다.

2. 초고주파 코딩방식

채널 코딩에 사용되는 forward error correction(FEC) 부호는 1950년 Hamming 코드를 시작으로 오류 정정 능력을 높이고 전력효율을 향상시키는 방향으로 발전하여 BCH, Reed-Solomon(RS), convolutional 코드를 거쳐 Shannon bound에 근접하는 Turbo 코드, LDPC 코드, 채널 양극화 현상을 이용한 Polar 코드가 발명되었고 다중 채널 통신을 고려한 Raptor 코드가 발표되었다[25].

최근 통신에 사용되는 FEC 부호는 252GHz에서 325GHz 사이의 THz 주파수 대역에서 최대 100Gbps 전송율 지원을 고려한 IEEE 802.15.3d에서는 LDPC(1440,1344)와 LDPC(1440,1056) 코드를 THz-SC PHY의 mandatory FEC로 하고 RS(240,224) 코드를 THz-OOK PHY의 mandatory FEC로 LDPC를 optional로 한다. 근거리 통신 규격인 IEEE 11ac/11ad/3an에서도 LDPC 코드를 사용하여 다양한 부호율을 지원한다. 3GPP의 경우 LTE/LTE-A까지 제어 채널에 convolutional 코드와 데이터 채널에 Turbo 코드를 사용하였으나 NR부터 제어채널에 Polar 코드를, 데이터 채널에 LDPC 코드를 적용하였다. 이는 규격에서 요구되어지는 신뢰도와 처리시간, 복잡도 및 최대 전송속도를 위한 데이터 길이에 따른 성능 등 표 4에서와 같이 각 FEC 부호의 특성을 상대적으로 분석하여 선택한다[26].

표 4 Turbo, LDPC, Polar code 비교

	Turbo	LDPC	Polar
Data length	Medium	Large	Small/ Very small
Code rate	Low	High	All
Decoding complexity	High	Low	Low
Reliability	High	High	High
Latency	Parallel high	Parallel low	Pipeline low

통신에서 데이터 처리 시 고신뢰, 저지연, 저전력이 요구되면서 이에 맞는 구조로 짧은 패킷 통신이 고려되고 복잡도가 낮으면서 적용 가능한 부호에 대한 분석이 이루어지고 있다[27]. 또한 FEC 부호를 구현 기술과 결합하여 5G 이후의 Tbps급 통신을 위한 고속 저전력 FEC 개발을 위해 유럽의 Enabling Practical Wireless Tbps Communications with Next Generation Channel Coding(EPIC) 프로젝트가 진행 중이며, 7가지 beyond 5G Tbps use case들을 고려하여 Turbo 코드, LDPC 코드, Polar 코드를 분석하고 7nm bulk CMOS 기술로 구현하여 EPIC FEC 요구사항에 맞춰 평가하여 결과를 내놓고 있다.

V. 초고주파 상위계층 기술동향

테라헤르츠 주파수 대역은 대역폭이 넓고 연속적인 무선 자원 할당이 용이하여 통신 시스템의 용량 증대 효과를 얻을 수 있으나 직진성과 전파손실이 강하기 때문에 표 5와 같이 주로 기기 내 통신, 근거리 P2P 통신, 데이터 센터 및 무선백홀 등과 같이 제한된 분야에서만 응용되었다. 그러나 다중 안테나 기술을 기반으로 한 빔 형성 기술이 이동통신 시스템에 적용되면서 테라헤르츠 대역을 포함한 초고주파 대역을 이동통신에 활용하기 위한 연구가 시작되고 있다[28].

테라헤르츠 이동통신 네트워크 및 상위 계층 측면에서 무선접속 및 링크 관리를 위한 제어 및 데이터 전송기술은 패킷전송, 연결 제어, 단말 송신 전력 제어, 핸드오버, 무선자원 관리 등의 요소기술로 구성된다. 또한 최대 전송용량 제공을 위해 캐리어 집성 기술이 요구되며, 이를 지원하기 위한 연결 제어 기술이 요구된다. 테라헤르츠 이동통신은 시스템 용량 증대 및 성능향상을 위해 대규모 안테나 어레이에 기반한 초세밀 빔 형성 기술, 분산형 다중점 다중안테나 기술 등이 활용되며, 이때 효과적인 다중접속, 이동성 지원 기술 및 셀 내외 빔 간섭제어 기술 등이 필요하다. 테라헤르츠 주파수 특성상 많은 음영지역이 발생하며, 이러한 환경에서도 사용자에게 언제 어디서나 고속의 사용자 체감 전송 속도를 제공하기 위해 Sub-6GHz, 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역을 활용한 multi-connectivity 기술이 필요하다.

표 5 테라헤르츠 통신 응용 분야

	환경	거리	서비스	특징
기기 내 통신	LoS NLoS	초단거리 (10cm 이내)	보드(칩) 간 통신	광대역 (270~320GHz)
근거리 P2P 통신	LoS	단거리 (100cm 이내)	KIOSK	IEEE 802.15.3c/ IEEE 802.11ad 표준 기반
데이터 센터	LoS NLoS	중거리 (1~수십 m)	서버 간 통신	케이블 연결 대체
무선 백홀	LoS	장거리 (수백 m ~수 km)	통신망 유선백홀 대체	경로손실 극복, 간섭 제어

초고주파의 단점인 높은 자유 공간 손실로 인한 한정된 도달거리와 안테나의 좁은 빔은 송신기의 전송 영역을 제한시키며 이로 인해 네트워크 커버리지의 설계를 어렵게 한다. 또한, 좁은 빔으로 구성된 전송 영역은 빔 스위칭 또는 핸드오버가 빈번히 일어나게 만든다. 초고주파의 장점인 넓은 대역폭은 적절한 전송 기술, 인터페이스 기술 및 데이터 무결성을 보장해 주기 위한 오류 복구 기술 및 재전송 기술을 통해 대용량 데이터 처리를 효율적으로 처리할 수 있게 한다.

초고주파 대역에서 이동통신 네트워크 설계를 할 때 상위 계층 측면에서 중점적으로 해결해야 하는 기술적 이슈는 높은 전파감쇄와 좁은 빔을 극복하는 무선 네트워크 구성 기술, 도로환경의 음영지역을 극복하고 Relay를 포함한 통신경로를 동적으로 재설정하는 기술, 접근을 통해 빠른 링크형성이 가능한 접속절차 단순화 기술 등이 필요하다.

테라헤르츠 이동통신 시스템은 mmWave 이동통신 시스템보다 더 세밀한 빔을 기반으로 하기 때문에 네트워크 설계가 어렵고 안정적인 통신 서비스를 제공하는 데 한계가 있다. 그러므로 mmWave 또는 테라헤르츠 스몰셀이 기존 마이크로파 매크로셀과 공존하는 two-tier 네트워크 구조에서 단말이 다중 연결의 지원을 통해 마이크로파 매크로셀에 접속하여 커버리지를 확보하고, mmWave 또는 테라헤르츠 스몰셀에 추가로 접속하여 더 높은 데이터 전송률을 얻을 수 있도록 한다. 따라서 이동성 관리 기술과 다중대역 multi-connectivity 기술을

유기적으로 결합하여 초세밀 massive 빔 운용 환경에서도 사용자가 체감할 수 있는 끊어짐 없는 고신뢰 통신 서비스를 제공할 수 있을 것이다.

VI. 결론

본 고에서는 향후 이동통신 서비스의 용량 증대와 고품질화를 위해 새로운 대안으로 떠오르는 200GHz 이상 초고주파 대역의 테라헤르츠 기술 동향에 대해 살펴보았다. 특히 극심한 전파감쇠와 좁은 빔 폭을 극복하여 고정 및 이동 무선통신으로 활용되기 위한 전파 특성 분석과 무선통신용 안테나 기술 및 시스템 개발 현황, 무선전송과 네트워크 구성요소 등에 대해 고찰하였다. 테라헤르츠 통신 기술은 6G 이동통신의 큰 변화로 예상되고 백홀 및 스몰셀 환경을 기반으로 점차 미래의 핵심 통신 기술로 자리 잡을 것으로 전망된다.

용어해설

테라헤르츠파(THz) 전자파 스펙트럼에서 전파와 광파 사이 0.3THz(λ=1mm)에서 3THz(λ=0.1mm) 주파수 대역의 전자기파를 의미하나 요즘은 좀 더 편하고 보편적인 숫자로 0.1THz에서 10THz 사이의 주파수를 통칭하여 사용

직접변환 방식 데이터 신호를 전파로 방사하기 위해 테라헤르츠파 대역으로 한 번에 주파수를 변환하는 방식

약어 정리

3GPP	3rd Generation Partnership Project
CMOS	Complementary Metal Oxide Semi-conductor
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
EVM	Error Vector Magnitude
FBMC	Filter Bank Multi-carrier
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FET	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
IQ	In-phase and Quadrature-phase
LDPC	Low Density Parity Check
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LoS	Line of Sight
NLOS	Non Line of Sight
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK	On-Off Keying
P2P	Pair to Pair
PA	Power Amplifier
PHY	Physical layer
PLL	Phase Locked Loop
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RS	Reed-Solomon
SBD	Schottky Barried Diode
SC	Single Carrier
TDD	Time Division Duplexing
THz	Terahertz
WRC	World Radiocommunication Con-ference

참고문헌

[1] IEEE 802.15, "IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 3d 100 Gbit/s Wireless (TG 3d (100G))," http://www.ieee802.org/15/pub/index_TG3d.html

[2] J.M. Eckhardt et al., "Measurements in a Real Data Centre at 300GHz and Recent Results," in Proc. EuCAP, Krakow, Poland,

2019.

[3] A. Hirata et al., "120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 54, no. 5, May. 2006, pp. 1937-1994.

[4] H.-J. Song et al., "Terahertz wireless communication link at 300GHz," in IEEE Int. Topical Meeting Microw. Photon., Montreal, Canada, Oct. 2010.

[5] Japan, "Preliminary proposal of 300GHz band propagation model for indoor mobile service applications under WRC-19 agenda item 1.15," Doc. 3K/58, June, 2016.

[6] S. Kim and A. Zajic, "Statistical modeling and simulation of short-range device-to-device communication channels at sub-THz frequencies," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 9, Sept. 2016, pp. 6423-6433.

[7] T.S. Rappaport et al., "Wireless communications and applications above 100GHz: Opportunities and Challenges for 6G and beyond," IEEE Access, vol. 7, June 2019, pp. 78279-78757.

[8] 전태인, "Terahertz pulse propagation in the atmosphere and gas sensing," 제7회 테라헤르츠 기술워크샵, 2018.6.29.

[9] ITU-R, "Attenuation by atmospheric gases," Recommendation ITU-R P.676-11, 2016.

[10] ITU-R, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," Recommendation ITU-R P.837-7, 2017.

[11] S. Koenig et al., "Wireless Sub-THz Communication System with High Data Rate," *Nature Photon.*, vol. 7, 2013, pp. 977-981.

[12] J.-N. Lee et al., "High Gain Dielectric Lens horn Antenna with the Metal Guide for Sub-Terahertz Communication Systems," ETRI Journal Submitted.

[13] 이정남 외, "테라헤르츠 시스템용 유전체 렌즈 혼 반사판 안테나 설계," 2019년 한국전자파학회 하계종합학술대회 논문집, 제7권 제1호, 2019, p. 520.

[14] 이정남 외, "테라헤르츠 시스템용 소형 카세그레인 안테나 설계," 2019년 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집, 2019, pp. 1129-1130.

[15] S. Lee et al., "9.5 An 80Gb/s 300GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," in Proc. *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, San Francisco, CA, USA, Feb. 2019, pp. 170-171.

[16] P. Rodriguez-Vazquez et al., "A 65 Gbps QPSK One Meter Wireless Link Operating at a 225-255GHz Tunable Carrier in a SiGe HBT Technology," in *IEEE Radio Wireless Symp., Anaheim*, CA, USA, 2018, pp. 146-149.

[17] H. Hamada et al., "300-GHz. 100-Gb/s InP-HEMT Wireless Transceiver Using a 300GHz Funadamental Mixer," in *IEEE Int. Microwave Symp.*, Philadelphia, PA, USA, June 2018, pp. 1480-1483.

[18] J.-D. Park et al., "A 260GHz Fully Integrated CMOS Transceiver for Wireless Chip-to-Chip Communication," in *IEEE Symp. VLSI Circuits*, Honolulu, HI, USA, June 2012, pp. 48-49.

[19] S. Kim et al., "300GHz Integrated Heterodyne Receiver and Transmitter With On-Chip Fundamental Local Oscillator," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, 2015, pp. 92-101.

[20] J.F. O'Hara et al., "A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications," Technol., vol 7, no. 2, 2019, doi: 10.3390/technologies7020043

[21] Ericsson, "Deutsche Telekom and Ericsson top 100Gbps over microwave link," 2019, http://www.ericson.com.

[22] W. Cheng et al., "Orbital angular momentum for wireless communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 1, 2019, pp. 100-107.

[23] NEC, "NEC successfully demonstrates real-time digital OAM mode multiplexing transmission in the 80GHz-band for the first time," 2019, https://nec.com/.

[24] BRAVE D2.0, "Beyond-5G Wireless Tbps Scenarios and Requirements," 2018, http://www.brave-beyond5g.com/.

[25] Amin Shokrollahi, "Raptor code," Bangalore, Dec. 2005.

[26] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Multiplexing and channel coding," 3GPP TS 38.212 V.15.4.0, 2018.

[27] G. Durisi, G. Liva, and F.Steiner, "Short-packet communications: fundamentals and practical coding schemes," IEEE GLOBECOM 2018.

[28] C. Han et al., "On medium access control schemes for wireless networks in the millimeter-wave and Terahertz bands," *Nano Commun. Netw.*, vol. 19, Mar. 2019, pp. 67-80.