포토닉스 기반 THz 전송 기술 동향

2020. 11. 20.
한국전자통신연구원
광네트워크연구실
책임연구원 조승현

제 1 장 개요

1. 서론

2019년 4월 5일 전세계 최초로 5G 이동통신의 상용서비스가 대한민국에서 시작되었다. 5G 기술의 상용화를 통해 우리는 그동안 접하지 못한 새로운 서비스를 경험할 수 있게 되었다. 예를 들어 4K/8K UHD 및 3D 영상등 초대용량 영상 서비스, 실감형 AR/VR 서비스, 자율주행차 및 원격의료 서비스등 기존 방식의 이동통신 기술로는 경험할 수 없었던 초고속, 초저지연, 초연결 특성을 갖는 다양한 새로운 서비스들을 실감할 수 있게 되었다. 하지만 자율주행을 포함한 일부 서비스들의 완전한 실현을 위해서는 앞서 열거한 몇가지 기술적 특성들의 개선이 요구되는 것이 현실이다. 이러한 기술적 진보를 달성하기 위해서는 전통적인 무선/이동통신 기술의 특성 측면에서 좀더 빠른 전송 속도, 좀더 짧은 지연 속도 등을 달성할 수 있는 추가적인 기술적 진보가 필요하다. 상술한 기술적 진보를 포함한 차세대 무선/이동통신 기술을 우리는 B5G 또는 6G 기술로 부르고 있다.

6G 기술의 실현을 위한 노력의 일환으로 현재 전세계적으로 활발히 연구되고 있는 분야가 THz 주파수 대역을 활용한 광대역 무선 전송 기술이다. THz 주파수 대역은 기존의 무선 통신 자원으로 활용되어온 RF/mmWave 대역과 달리 매우 넓은 주파수 대역을 통신에 활용할 수 있어 최대 Tbps급의 전송 속도를 실제로 구현할 수 있다고 알려져 있다. 이를 입증하기 위해 지금까지 전세계적으로 많은 연구 그룹들이 THz 대역에서의 통신 기술에 대한 기술적 가능성을 검증하였다.

현재까지 발표된 결과들을 기술적으로 분류해보면 전자소자 기반의 접근 방식과 포토닉스 기반의 접근 방식이 존재한다. 전통적인 무선/이동통신 기술의 구현은 전자소자 기반의 접근 방식이 주를 이루었으나 주파수 대역이 THz로 높아지면서 포토닉스 기반의 접근 방식도 각광을 받기 시작했다. 전자소자 기반의 접근 방식은 주로 높은 캐리어 주파수에서의 동작 특성 확보를 위해 III-V 계열의 화합물 반도체를 활용한 HEMT 또는 HBT 소자들로부터 최근 들어 Si 또는 SiGe 물질을 이용한 CMOS 기반의 소자들을 이용한 초고속 데이터 전송 시험 결과가 보고되고 있다. 포토닉스 기반의 접근 방식은 성숙된 광통신 부품 및 시스템 기술을 활용하여 0.1Tbps급 이상의 데이터를 100m 이상의 거리에서 전송한 시험 결과들이 보고되고 있다. 더불어 포토닉스 기반 접근 방식의 경우 광대역, 초고속 특성을 갖는 광통신 기술을 활용하므로, 기존 유선망과의

seamless한 연결성을 제공하여 상대적으로 손쉽게 유무선 통합망 구축이 가능하다는 장점을 제공한다. 그러나 집적화/소형화 및 전자소자 접근 방식에 비해 경제성을 확보할 수 있는 방법에 대한 연구 개발이 필요하다.

본 보고서에서는 상술한 두가지 방식 중 포토닉스 기술을 활용한 THz 전송 기술에 대해서 기술의 개념 및 필요성, 활용분야, 국내외 관련 기술 개발 동향, 시장 규모 및 향후 전망 및 표준화 현황 등에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 기술 상세 설명

2.1 포토닉스 기반 THz 전송 기술 개념

포토닉스 기반 THz 전송 기술에 대한 개념을 설명하기 위한 그림을 아래의 그림1에 표기하였다. 포토닉스 기반 THz 전송 기술은 약 0.1Tbps급 이상의 모바일 데이터 서비스 제공을 위하여 광대역 주파수 활용이 가능한 THz 주파수 대역에서 포토닉스 기술을 활용하여 THz 신호를 생성하고, 이를 임의의 무선 구간에서 전송하는 기술을 의미한다. 포토닉스 기반 THz 전송 기술을 통신 분야에 적용하기 위해서는 다음과 같은 3가지의 구성 요소들이 필요하다.

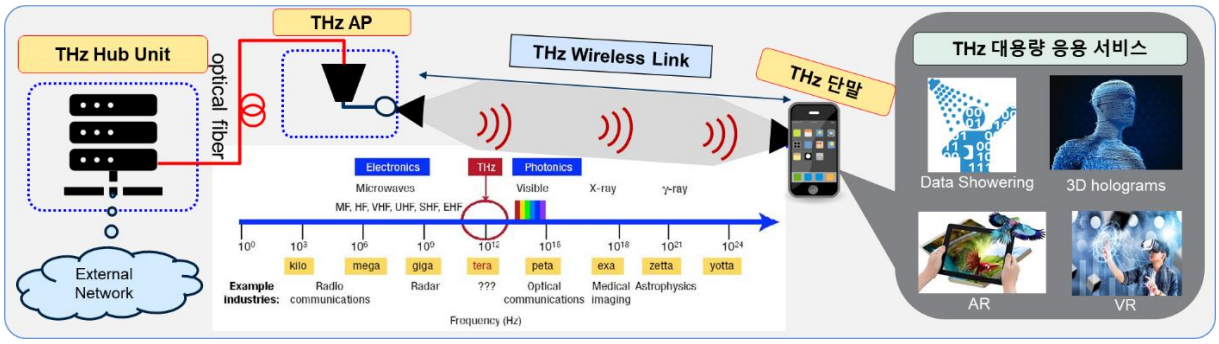


그림 1. 포토닉스 기반 THz 전송 기술 개념도

- THz Hub Unit: 성숙된 광통신 기술을 활용해 0.1 TGbps급 이상의 대용량 데이터 변조 및 복조 기능을 수행하여, 외부 네트워크와 연결되는 허브 기능을 제공한다.
- THz AP (access point): THz Access Point로써 THz Hub Unit에서 발생된 대용량의 데이터 신호를 무선 구간 전송을 위해 THz wave로 변환하는 역할을 수행
- THz 단말: THz 사용자 단말 장치, 0.1 Tbps급의 대용량 데이터 (Data

Showering, 3D 홀로그램, AR, VR등) 서비스 활용이 가능하도록 해주는 사용자 단말 장치

2.2 THz 전송 기술 필요성

이미 잘 알려진 바와 같이, 이동통신 기술의 진화 그리고 모바일 단말 장치 시장의 급격한 성장으로 말미암아 글로벌 모바일 트래픽은 매년 폭증하고 있다. 미국의 Cisco에서 발표한 결과에 따르면 2016년 약 4 EB (Exa Byte)였던 모바일 트래픽은 2018년 약 17 EB를 거쳐, 2021년에는 49 EB로 성장할 것으로 전망하고 있다. 또한 4G LTE 및 5G 기술등 다양한 이동통신/무선통신 서비스의 보급으로 인해 가용 주파수 자원이 고갈되고 있으며, 현재 100 Gbps급의 대용량 데이터 전송이 가능한 주파수 대역으로는 THz 대역이 유일하며, 아직까지는 미개척 주파수 자원으로 향후 통신 서비스의 진화에 따른 초광대역 데이터 서비스를 실현하기 위해서는 THz 대역을 활용한 통신 기술의 개발이 시급한 실정이다.

앞서 언급한 이동/무선 통신 기술의 진화 방향을 살펴보면 2000년대 3G 기술의 상용화시 기지국이 제공할 수 있는 최대전송속도는 약 100 Mbps이었고, 2010년대 4G 기술의 상용화시에는 LTE 기지국이 제공할 수 있는 최대전송속도는 약 1 Gbps이었다. 2020년 현재 5G 기지국은 최대 20 Gbps 속도로 데이터를 제공할 수 있지만 앞으로 10년 후에는 Tbps급의 데이터 전송 속도를 요구할 것으로 전망되고 있으며, 이러한 요구사항을 만족하는 후보 기술로서 THz 전송 기술이 현재 전세계적으로 활발히 논의되고 있는 상황이다. 더불어 THz 전송 기술은 통신 기술 외에도 THz 파를 이용한 다양한 응용분야에 활용할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 의료 영상, 보안 시스템 및 분광기 등의 분야에 활용이 가능하다. 따라서 상술한 이유들로 인해 세계 유수 선진국에서는 이미 THz 전송 기술에 대한 연구개발을 2010년대 초반부터 활발하게 진행하고 있는 실정이다.

2.3 THz 전송 기술 활용 분야

THz 전송 기술의 활용 분야는 무선 전송 분야 및 무압축 초고해상도 이미징 시스템, 3D 디스플레이 및 데이터 통신, HPC (high performance computing), 근거리 암호 통신, 데이터 센터 서버와 랙(rack)간 통신등이 있다. 이와 관련된 서비스로는 수 m 반경 이내의 근거리 대용량 데이터 통신 서비스, 화상회의 서비스, 홀로그래픽 영상의 무선 전송 서비스, 항공기내 기기 혼선을 일으키지

않는 무선 통신 관련 서비스, 대용량 데이터 다운로드 키오스크 등의 서비스 등으로 파악된다. 더불어 THz 나노셀, 건물 내 무선 통신, 건물 간 통신 및 차세대 이동통신을 위한 무선 프론트홀/백홀 등의 분야로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

제 3 장 기술 개발 동향

3.1. 기술 분류

THz 전송 기술 동향은 실리콘 반도체 또는 화합물 반도체를 활용한 전자소자 기반의 THz 전송 기술과 광통신 기술을 활용한 포토닉스 기반 THz 전송 기술로 분류하여 논의하고자 한다. 본격적인 기술 개발 동향 소개에 앞서 전자소자 기반 및 포토닉스 기반의 THz 전송 기술을 구현하기 위한 기본 요소들에 대한 설명은 아래와 같다. 아래의 그림 2에는 전자소자 기반 THz 전송 기술을 구현하기 위한 THz 송신기 및 THz 수신기의 기본 기능 블록들을 보여준다.

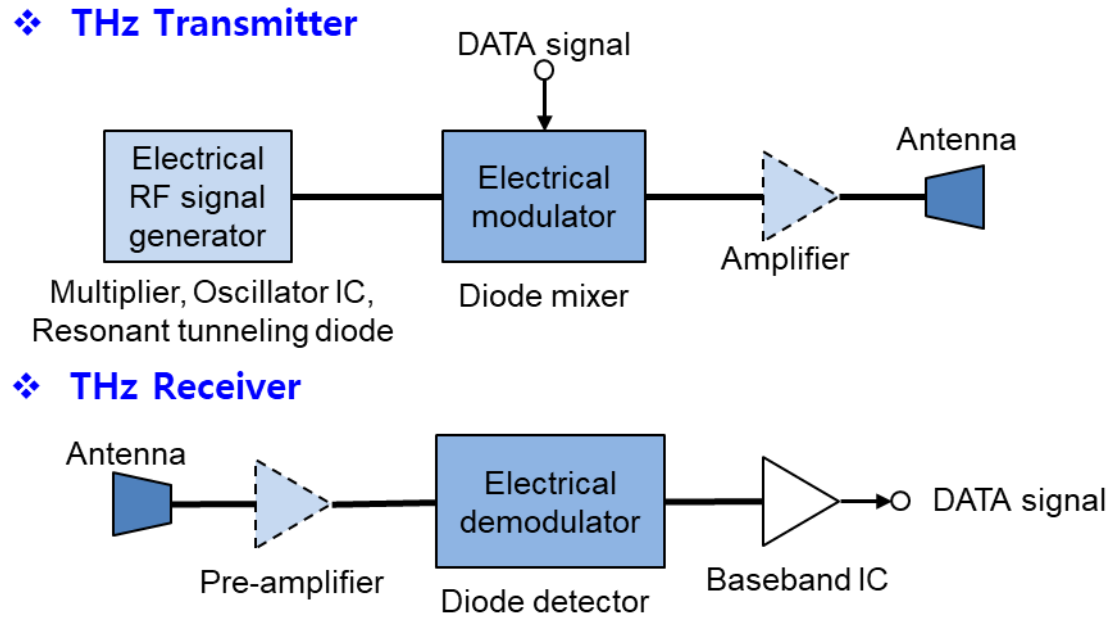


그림 2. 전자소자 기반 THz 송신기 및 THz 수신기 구조

전자소자 기반 THz 송신기는 multiplier 또는 oscillator IC 및 resonant tunneling diode등으로 구성되는 전기적 RF 신호 생성기와 diode mixer등으로 구현이 가능한 전기적 변조기 및 파워증폭기와 안테나 등으로 구성된다. 현재까지 논문

등을 통해 보고된 바에 의하면 약 300 GHz 이하의 주파수 대역에서 전송이 가능하며, 최대 전송 속도는 100 Gbps, 그리고 최대 전송 거리는 50 dBi급의 Cassegrain 안테나등을 적용할 경우 10m 까지로 알려져 있다. 전자소자 기반의 THz 전송 기술은 반도체 IC 기술을 직접 적용할 수 있으므로 소형화/집적화/저전력화가 가능하다는 것과, 성숙된 실리콘 및 화합물 반도체 공정을 이용해 대량 생산이 가능하다는 장점이 있다. 반면에 고주파 신호 생성을 위해 frequency multiplier chain의 비선형 특성에 따라 생성된 신호의 SNR이 비교적 작다는점 그리고 diode mixer등을 활용할 경우 변조 신호의 변조 지수(modulation index)가 제한된다는 단점등이 있다.

아래의 그림 3에는 포토닉스 기반 THz 전송 기술을 구현하기 위한 THz 송신기 및 THz 수신기의 기본 기능 블록들을 보여준다.

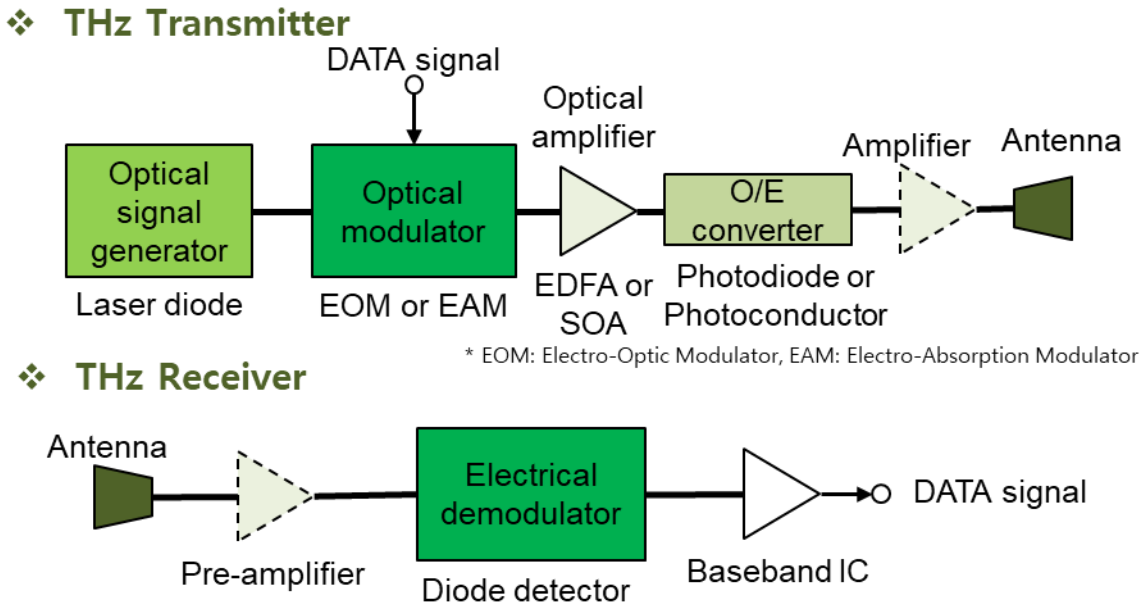


그림 3. 포토닉스 기반 THz 송신기 및 THz 수신기 구조

포토닉스 기반 THz 송신기는 레이저 다이오드 또는 optical comb generator 등으로 구성되는 광신호 발생기와 electro-optic modulator 또는 electro-absorption modulator등으로 구현이 가능한 광학적 변조기, 어븀첨가 광섬유 증폭기 또는 반도체 광증폭기 등으로 구성된 광신호 증폭기 그리고 photodiode 또는 photoconductor등으로 구현이 가능한 광/전변환기 마지막으로 파워증폭기와 안테나 등으로 구성된다. 현재까지 논문등을 통해 보고된 바에 의하면 약 1 THz 이하의 주파수 대역에서 전송이 가능하며, 최대 전송 속도는 단일 채널의 경우 100 Gbps, 편광 분할 다중 방식까지 적용한 다중 채널의 경우

600 Gbps까지 보고되었다. 그리고 최대 전송 거리는 THz 대역의 증폭기 기술을 적용할 경우 110m까지로 알려져 있다. 포토닉스 기반의 THz 전송 기술은 광대역/초고속 특성을 갖는 성숙된 광통신 부품/전송 기술을 활용할 수 있으므로 고속화/대용량화가 가능하다는 것과, 광부품 기술을 이용함으로 인해 광학적으로 THz wave를 비교적 쉽게 생성할 수 있고 광변조기 기술을 적용함으로써 변조 지수 제어가 자유롭다는 장점이 있다. 상술한 장점들을 통해, 요구되는 SNR 확보 및 전송 거리 확대가 유리하다. 반면에 전자소자 IC에 비해 부피가 크고 상면적이 크다는 점은 단점이다. 향후 실용화를 위해서는 소형화/집적화/저전력화 구현을 위한 노력이 반드시 뒤따라야 한다.

아래의 그림4에는 최근 3년동안 발표된 논문 또는 학술회의에서 보고된 데이터들을 기반으로 THz 전송 기술을 구현함에 있어 전송속도와 캐리어 주파수 간의 관계를 보여준다 [1~20].

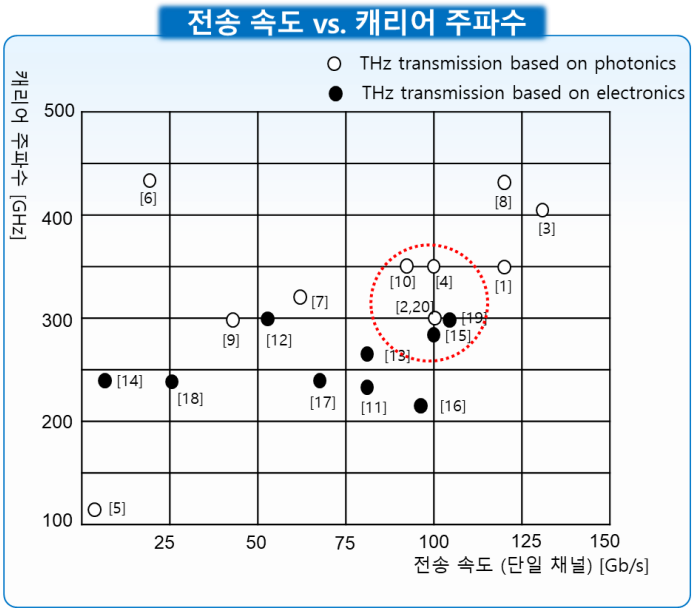


그림 4. THz 전송 기술 구현 시 사용된 전송 속도와 캐리어 주파수 사이의 관계 [1~20]

그림 4에서 볼 수 있듯이, 전자소자 및 포토닉스 기반의 THz 전송 기술을 구현하는데 있어, 300 GHz 대역에서 약 100 Gbps 전송 속도 결과가 가장 많이 도출되었음을 알 수 있다. 포토닉스 기반 THz 전송 기술의 결과가 전자소자 기반 전송 기술과 직접적인 비교시 상대적으로 데이터 전송 속도가 조금 더 우위에 있음을 알 수 있다. 포토닉스 기반 접근 방식을 사용하는 THz 전송 시스템의 경우 편광 분할 다중화 방법을 적용하여 다중채널 전송시 최대 600 Gbps (@300 GHz) 전송 결과까지 보고되었다.

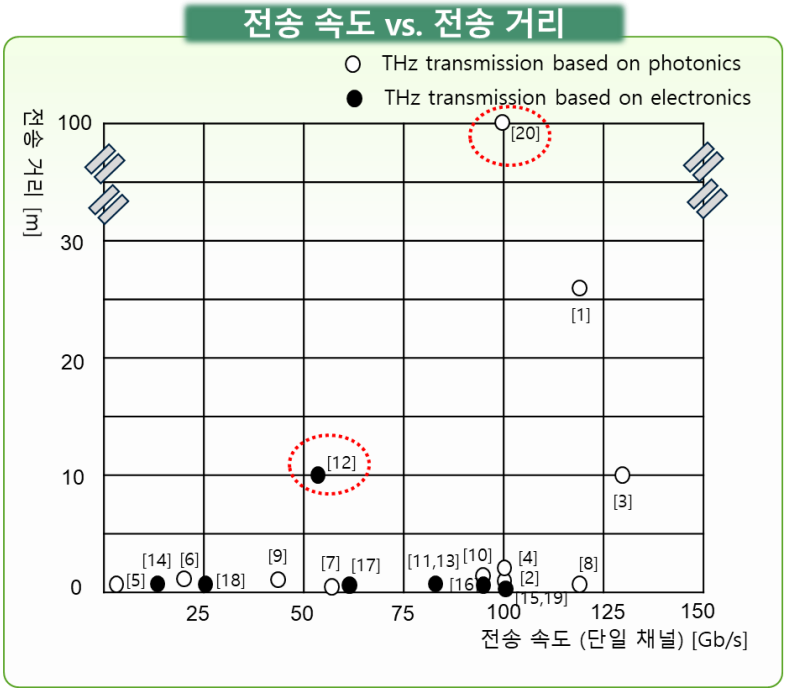


그림 5. THz 전송 기술 구현 시 사용된 전송 속도와 전송 거리 사이의 관계 [1~20]

그림 5에는 THz 전송 기술 구현시 전송 속도와 전송 거리 간의 관계를 보여준다 [1~20]. 전자소자 또는 포토닉스 기반의 THz 전송 기술 구현시, 다양한 전송 속도에서 1m 이하의 거리에서 전송한 결과가 대부분임을 알 수 있다. 특별히 최대 전송 거리 110m를 보고한 독일의 KIT는 THz 대역에서 동작하는 증폭기를 송신단 및 수신단에 모두 사용하였다 [20]. 더불어 전자소자 기반의 THz 전송 결과 중 전송거리 10m 결과를 보고한 독일의 Stuttgart 대학에서는 72dBi급의 고이득 Cassegrain 안테나를 사용하였다. [12] 현재의 기술 수준으로 THz 대역에서 100 Gbps급의 데이터를 10m 이상 전송하기 위해서는 THz 대역에서 동작하는 증폭기 또는 70dBi 급의 고이득 안테나가 필수적으로 요구됨을 알 수 있다.

.

3.2 전자소자 기반 THz 전송 기술 개발 동향

전자소자 기반의 THz 전송 기술과 관련하여 최근 3년간 발표된 저널 및 학술회의 프로시딩 자료등을 검토하여 개발 동향을 아래의 표1에 요약하여 정리하였다 [11~19].

표 1 전자소자 기반 THz 전송 기술 동향

순번	기술	주파수	전송속도	변조방식	전송거리	안테나 이득	발표년도	개발기관
1	0.13um SiGe	220~260	81 Gbps	64-QAM	1 m	25 dBi	2019	IHCT &

	HBT	GHz						Wuppertal 대학
2	35nm InGaAs mHEMT	285~315 GHz	56 Gbps	16-QAM	10 m	73 dBi	2019	Stuttgart 대학
3	40nm CMOS	266 GHz	80 Gbps	16-QAM	0.03 m	48 dBi	2019	Hiroshima 대학
4	130nm SiGe BiCMOS	240 GHz	15.6 Gbps	16-QAM	0.15 m	14 dBi	2019	IHP
5	80nm InP HEMT	272~302 GHz	100 Gbps	16-QAM	2.22 m	100 dBi	2018	NTT
6	0.13um SiGe HBT	230 GHz	90 Gbps	16-QAM	1 m	25 dBi	2018	IHCT & Wuppertal 대학
7	0.13um SiGe HBT	225~255 GHz	65 Gbps	4-QAM	1 m	25 dBi	2018	IHCT & Wuppertal 대학
8	130nm SiGe BiCMOS	240 GHz	25 Gbps	BPSK	0.15 m	14 dBi	2018	IHP
9	40nm CMOS	300 GHz	105 Gbps	32-QAM	N/A	N/A	2017	Hiroshima 대학

독일의 IHCT와 Wuppertal 대학은 2019년 'Radio and wireless symposium' 학술대회에서 SiGe HBT 기술을 이용하여 중심주파수 260 GHz에서 변조 포맷의 가변이 가능한 Tunable M-QAM 트랜시버를 제작하고, 81 Gbps급의 데이터를 1m 전송한 결과를 보고하였다[11]. 최고 전송 속도와 최대 전송거리를 얻기 위해서 25 dBi급의 안테나를 송/수신단에 각각 사용하였고, 기저대역신호는 64-QAM 변복조 방식을 채택하였다. 독일의 Stuttgart 대학은 2019년 European Microwave Conference (EuMC)에서 35nm InGaAs mHEMT 기술을 이용하여, 중심주파수 300 GHz에서 16-QAM 변조 방식을 적용한 THz 전송 데모 시스템을 구축하고 56 Gbps급의 데이터를 10m 전송한 결과를 보고하였다[12]. 전송 거리 확장을 위하여 슈퍼헤테로다인 방식을 활용하였을 뿐만 아니라 72dBi급의 높은 이득을 갖는 안테나를 적용하였다. 일본의 히로시마 대학은 2019년 Journal of Solid State Circuit에서 40nm CMOS 공정을 이용하여 중심주파수 265.68 GHz에서 16-QAM 변조 방식을 적용한 THz 전송 데모 시스템을 구축하고 80 Gbps급의 데이터를 0.03m 전송한 결과를 보고하였다[13]. 실리콘 CMOS 공정의 한계로 인해 파워증폭기와 저잡음 증폭기 없이 전송하였으며, 증폭기의 도움 없이 전송을 하기 위해 송신단에서 출력 파워를 결합하여 전송하는 double-rat-race 구조를

적용하였다. 일본의 NTT는 2018년 IEEE Microwave Theory and Techniques Society가 주관한 International Microwave Symposium에서 80nm InP HEMT 공정을 이용하여 중심주파수 300 GHz에서 16-QAM 변조 방식을 적용한 THz 전송 데모 시스템을 구축하고 100 Gbps급의 데이터를 2.22m 전송한 결과를 보고하였다[15]. 전송 거리 확장을 위해서 14dB 이득을 갖는 출력증폭기와 저잡음 증폭기를 송/수신단 각각에 적용하였으며, 데이터 전송 속도를 40 Gbps로 축소할 경우 최대 전송 거리는 9.4m까지 확장이 가능함을 보고하였다. 독일의 IHP는 2018년 Journal of Solid State Circuit에서 130nm SiGe BiCMOS 공정을 이용하여 중심주파수 240 GHz에서 BPSK 변조 방식을 적용한 THz 트랜시버를 설계 및 제작하고 25 Gbps급의 데이터를 14dBi급의 안테나를 이용해 0.15m 전송한 결과를 보고하였다[18]. 제작된 트랜시버의 송신단 3dB 대역폭은 약 35 GHz, 수신단 3dB 대역폭은 약 55 GHz 이었다.

3.3 포토닉스 기반 THz 전송 기술 개발 동향

포토닉스 기반의 THz 전송 기술과 관련하여 최근 3년간 발표된 논문 및 학술회의 프로시딩 자료등을 활용하여 개발 동향을 아래의 표2에 요약하여 정리하였다. [1~10, 20]

표 2 포토닉스 기반 THz 전송 기술 동향

순번	기술	주파수	전송속도	변조방식	전송거리	발표년도	개발기관
1	Kramers-Kronig SBD based-Rx,THz amplifiers	300 GHz	115 Gbps	QPSK	110 m	2020	KIT
2	Probabilistic shaping for better spectral efficiency	350 GHz	120 Gbps	PS-16QAM-OFDM	26.8 m	2020	Zhejiang Univ
3	Real-time digital coherent optical modem	300 GHz	100 Gbps	PDM-QPSK	0.5m	2020	HHI
4	Integrated Dual-λ DFB LDs & Probabilistic shaping	408 GHz	131 Gbps	16QAM-OFDM	10.7 m	2019	DTU
5	Enhanced UTC-PD	350 GHz	100 Gbps	16QAM	2 m	2018	Zhejiang Univ.
6	DFB-LD based commercial optical transceiver	138 GHz	5.5 Gbps	NRZ-OOK	1.5m	2018	Polytechnique Montréal
7	Six-channel WDM/PDM-QPSK	437.5 GHz	120 Gbps	QPSK	10-km SMF	2018	DTU

			(6×20 Gbps)		142 cm wireless		
8	Coherent THz-over-Fiber architecture	325 GHz	59 Gbps	64QAM-OFDM	2 km SMF 5 cm wireless	2017	Univ. of Dusburg
9	Coherent transmission using optical frequency comb	425 GHz	120 Gbps (net: 106 Gbps)	16QAM	50 cm	2017	Zhejiang Univ.
10	Si Photonics	300 GHz	40 Gbps	NRZ	1.4 m	2020	ETRI
11	PAM-N Transmission	300 GHz	90 Gbps	PAM	1.4 m	2020	ETRI

독일의 KIT는 2020년 Nature Photonics 논문지에서 Kramers-Kronig receiver와 THz 대역의 증폭기를 송신단 및 수신단에 각각 출력증폭기와 저잡음 증폭기로 사용하여 중심주파수 300 GHz에서 115 Gbps급의 데이터를 110m 전송한 결과를 보고하였다[20]. 변조 포맷으로는 16-QAM을 사용하였으며, THz 대역 증폭기의 이득은 25dB로 알려졌다. 현재까지 보고된 THz 전송 기술 중 가장 먼 거리 전송 기록을 달성한 것에 큰 의미가 있다. 중국의 Zhejiang 대학은 2020년 APL Photonics 논문지에서 Probabilistic shaping 기술과 50dBi급 Cassegrain 안테나를 사용하여 중심주파수 350 GHz에서 120 Gbps급의 데이터를 28.6m 전송한 결과를 보고하였다[1]. 변조 포맷으로는 Probabilistic shaping 기반의 16-QAM OFDM을 사용한 것으로 보고되었다. 독일의 HHI는 2020년 OFC 학술회의에서 Real-time digital coherent optical modem 기술을 사용하여 중심주파수 300 GHz에서 실시간으로 100 Gbps급의 데이터를 0.5 m 전송한 결과를 보고하였다[2]. 변조 및 다중화 방식으로는 PDM-QPSK 포맷을 사용하였다. 덴마크공대는 2019년 OFC 학술회의에서 Integrated Dual-λ DFB-LD를 광원으로 사용하고 Probabilistic shaping 기술을 변복조 기술로 활용하여 중심주파수 408 GHz에서 131 Gbps급의 데이터를 10.7 m 전송한 결과를 보고하였다[3]. 변조 포맷으로는 16-QAM OFDM을 사용하였다. 중국의 Zhejiang 대학은 2018년 Photonics Technology Letter 논문지에서 Enhanced UTC-PD를 포토믹서로 사용하여 중심주파수 350 GHz에서 100 Gbps급의 데이터를 2 m 전송한 결과를 보고하였다[4]. 변조 포맷으로는 16-QAM을 사용하였다. 캐나다의 몬트리얼 공대는 2018년 IEEE Access 논문지에서 DFB-LD 기반의 상용 광 트랜시버를 사용하여 중심주파수 138

GHz에서 5.5 Gbps급의 4K UHD 영상 데이터를 실시간으로 1.5 m 전송한 결과를 보고하였다[5]. 또한 덴마크공대는 2018년 OFC 학술회의에서 6채널의 WDM/PDM-QPSK 변조 및 다중화 기술을 활용하여 중심주파수 437.5 GHz에서 120 Gbps (6채널 x 20 Gbps)급의 데이터를 142 cm 의 무선 구간과 10km의 광선로를 통해 전송한 결과를 보고하였다[6]. 변조 포맷으로는 16-QAM OFDM을 사용하였다. THz 전송을 함에 있어서 처음으로 WDM 기술을 적용하여 전송 용량을 확대한 것에 큰 의미가 있다. 독일의 뒤스부르크 공대는 2017년 Optics Express 논문지에서 Coherent THz-over-Fiber architecture를 처음으로 제안하고, 중심주파수 325 GHz에서 59 Gbps 데이터를 5 cm의 무선 구간과 2km의 광선로를 통해 전송한 결과를 보고하였다[7]. 변조 포맷으로는 64-QAM OFDM을 사용하였다. 중국의 Zhejiang 대학은 2017년 Optics Express 논문지에서 Optical Frequency Comb을 THz 발생용 비팅 광원으로 사용하고 coherent optical transmission 기술을 활용하여 중심주파수 425 GHz에서 120 Gbps급의 데이터를 50 cm 전송한 결과를 보고하였다[8]. 변조 포맷으로는 16-QAM을 사용하였다. 대한민국의 ETRI는 2020년 Optics Express 논문지에서 세계 최초로 Si Photonics 기술을 활용하여 광변조기, 광감쇄기 및 광결합기들을 실리콘 단일 기판위에서 집적화하여 THz 발생 장치를 제작하고 중심주파수 300 GHz에서 NRZ-OOK 변조된 40 Gbps급의 데이터를 1.4 m 전송한 결과를 보고하였다[9]. 그동안 포토닉스 기술의 단점으로 지적되어온 부피가 크고 상면적이 넓은 광부품을 사용하여 THz를 발생시키는 방식을 탈피하여 포토닉스 기반 THz 전송 기술의 소형화/저가화/저전력화를 위한 기술적 교두보를 확보했다는 사실에 큰 의미가 있다. 또한 ETRI는 2020년 IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 논문지에서 세계 최초로 PAM-N 변조 기술을 활용하여 중심주파수 300 GHz에서 90 Gbps급의 데이터를 1.4 m 전송한 결과를 보고하였다[10]. 단거리 구간인 데이터센터 네트워크 및 광액세스 네트워크에서 많이 사용되는 PAM 변조 기술을 THz 전송 기술에 처음으로 적용하여 THz 전송 시스템의 저가화를 추진할 수 있다는 근거를 제시했다는 점에서 본 결과는 상당한 의미를 갖는다. PAM 변조 기술을 활용할 경우 가격이 비싼 광 IQ 변조기 대신에 직접 변조 LD 또는 광 세기 변조기등의 저가형 광 부품을 활용할 수 있으므로 경제적인 구현이 가능하다는 장점을 제공한다.

제 4 장 기술의 시장 현황 및 전망

THz 관련 전체 시장 규모 및 향후 전망은 아래의 표3과 같다. 2018년 전체 규모는 약 1억 7천만 달러에서 2022년 5억 달러 수준으로 증가할 것으로 예상된다. 이중 통신 관련 분야는 2018년 약 2천만 달러 수준에서 2022년 약 4천 3백만 달러 수준으로 CAGR은 대상 분야 중 가장 높은 34.1%로 집계되었다. 향후 2030년경에 6G 기술이 상용화되고, 현재는 6G 후보 기술 중 하나로 논의중인 THz 대역 통신 기술이 6G 기술로 채택된다면 시장 규모와 성장률은 아래의 표3에서 집계된 CAGR을 훨씬 뛰어넘는 수준이 될 것으로 예상된다.

표 3 분야별 THz 관련 시장 규모

(단위: $M)

	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	CAGR
보건·의료	27.4	36.5	48.8	65.1	87.3	33.5%
국방·보안	16.2	20.7	26.4	33.7	43.2	27.6%
통신	20.3	27.2	36.5	48.9	66.0	34.1%
산업	36.3	46.9	60.8	78.5	102.1	29.4%
식품·농업	12.1	15.9	21.1	27.7	36.7	31.9%
실험실	49.2	63.1	81.1	104.0	134.2	28.4%
기타	9.2	12.2	16.0	20.6	26.8	30.8%
합계	170.7	222.5	290.7	378.5	496.3	26.1%

* 시장 자료는 2017년에 발표된 "Global Terahertz Technologies Market" (Mordor Intelligence사)에서 발췌하여 작성

제 5 장 표준화 현황

THz 전송 기술에 대한 표준화는 2007년에 IEEE 802.15 Working Group (WSN: Wireless Specialty Networks)에서 275 ~ 3000 GHz의 주파수 대역을 이용하는 THz 무선 전송 기술의 Interest Group (IG)을 개설하고, 표준화 관련 이슈들에 대한 논의를 시작하였다. 2020년 현재는 IEEE 802.15 워킹 그룹 산하에는 12개 주제에 대한 서브 워킹 그룹들이 존재하며, THz 통신 기술 관련 서브 워킹 그룹은 Standing Committee THz로 그 명칭이 바뀌어서 운영되고 있다. 아래의 그림6에는 현재의 IEEE 802.15 워킹 그룹의 주요 activity들을 보여주고 있다.



그림 6. IEEE 802.15 워킹 그룹 activity 현황 (참고: https://www.ieee802.org/15/)

IEEE 802.15 워킹 그룹에서는 수 cm에서 수 km 거리의 소자, 부품, 장치, 사람 간에 10 Gbps에서 1 Tbps의 속도로 통신을 하는 무선 전송 기술에 대한 다양한 이슈를 정의하고, 이에 대한 논의를 진행하였다. 이를 2011년 이후부터 주요 논의 내용들을 연차별로 아래에 정리하였다.

- (2011~2012년) 실내 환경에서 다양한 surface의 roughness가 무선 전송 시스템에 미치는 영향, 분산에 의한 영향, 외부 온도가 THz 발생기 및 수신기에 미치는 영향, WLAN 등 다양한 어플리케이션에 대한 논의, THz 도파로, THz 파가 인체에 미치는 영향 등에 논의를 진행하였다.
- (2013~2014년) 100Gbps 무선 전송 기술의 모바일 백홀 및 프론트홀로의 응용, 장치간 통신에서의 전파특성 등에 대한 논의 등을 진행하였다.
- (2015~2016년) 이동 중인 유저에 요구되는 THz 파의 입사각 특성, 실내

환경에서의 THz 무선 채널 분석, THz 무선 전송 시스템을 위한 Phased Array의 특성 등에 대한 논의를 진행하였다.

- (2017년 이후) 다양한 실내 환경에 대한 채널 분석 및 THz 파의 입사각 특성 분석, 건물 입구에서 발생하는 THz 파의 손실 분석, THz 무선 전송 기술을 위한 반도체 기술과 차세대 Forward Error Correction (FEC) 기술 등에 대한 논의 진행하였다.

IEEE 802.15 워킹 그룹에서 논의가 완료된 표준문서들 중 THz 전송 기술과 직접적으로 관련된 것은 IEEE 802.15 TG3d로 볼 수 있다. IEEE 802.15 TG3d는 2013년에 IEEE 802.15 Task Group TG3d (100Gbps wireless)라는이름으로 서브 워킹 그룹이 생성되어 THz 주파수 대역을 이용하는 100 Gbps 급 무선 전송 시스템에 대한 본격적인 표준화 과정을 진행하였다. 2013~2014년 기간 동안은 무선 백홀 및 프론트홀의 요구사항에 대한 논의, 30 Gbps급 THz 무선 전송 시스템 및 무선 채널환경, 장치 간 통신에 대한 논의, KIOSK 다운로딩 시나리오에 대한 논의, 단거리 MIMO 채널 분석에 대한 논의 등을 진행하였다. 이후 2015~2016년 기간 동안에는 100 Gbps급 무선 전송 기술의 어플리케이션, 주파수 할당, KIOSK 적용시의 전파 특성, 물리 계층 상세설계, FEC의 특성 등에 대해 논의를 진행하였다. 2017년 이후부터는 275GHz 이상의 주파수 영역에 대한 규제 관련 논의와 더불어 300GHz 이상의 주파수 대역에서의 초광대역 MIMO 채널 및 안테나 특성에 대한 논의를 진행하였다.

더불어 IEEE 802.15 WPANs 워킹 그룹에서는 THz파 조사량에 따라 인체 영향을 받을 수 있는 출력을 별도로 규정하였다. (Doc. IEEE 802.15-12-0376-00-0thz_Exposure_Guideline_THz radiation) 상기 문서에서는 특수 작업 공간 및 일반(공공) 공간에 대하여 각각 50W/m^2 및 10W/m^2 이하의 조사량을 지켜야 함을 제시하였다.

제 6 장 요약

지금까지 포토닉스 기술을 활용한 THz 전송 기술에 대해서 기술의 개념 및 필요성, 활용분야, 그리고 THz 전송 기술과 관련하여 전자소자를 이용한 접근 방법 및 포토닉스 기술을 이용한 접근 방법에 대해서 기술적인 측면에서 상세하게 살펴보았고, THz 전송 기술 개발과 관련하여 앞서 분류한 두가지 방식별로 국내외 관련 최신 기술 개발 동향에 대해서 상세하게 검토하였다. 시장 현황 및 향후 전망 그리고 표준화 동향 등에 대해서 검토하였다.

현재 시점에서 THz 전송 기술은 향후 도래할 6G 이동통신을 구현할 후보 기술로서 전세계적으로 연구 개발이 활발히 이루어 지고 있다. 6G 후보 기술로서 THz 전송 기술은 기존의 전통적인 전자소자 기반의 접근 방식과 포토닉스 기술을 활용한 접근 방식 모두가 각각의 장단점을 갖고 있기 때문에 어느 한가지 방식으로 수렴되기 보다는 각각의 기술적 장점을 혼용해서 실현이 이루어질 것으로 예상된다. 특히 포토닉스 기반의 접근 방식은 실내 환경의 인도어 네트워크 등에 적용할 경우 유선과 무선 통신사이의 seamless한 연결성의 제공이 가능하므로 기본의 광통신 기술의 장점인 광대역/초고속 특성을 십분 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 국내에서도 상술한 두가지 접근 방식에 대해서 별도로 연구 개발이 이루어지고 있으나, 가까운 미래에 두 기술 방식의 접점이 도출될 것이며, 융합된 기술의 가치가 가시적 드러날 것으로 기대된다.

[약어]

3D	3-dimension
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
B5G	Beyond 5G
BiCMOS	Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAGR	compound annual growth rate
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DFB-LD	Distributed Feedback Laser Diode
DTU	Technical University of Denmark
EAM	Electro-Absorption Modulator
EB	Exa Byte
EOM	Electro-Optic Modulator
FEC	Forward Error Correction
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HHI	Heinrich-Hertz-Institute
HPC	high performance computing
IC	Integrated Circuit
InGaAs	Indium Gallium Arsenide
InP	Indium Phosphide
IHCT	Institute for High Frequency & Communication Technology
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multi Input Multi Output
mHEMT	Metamorphic High Electron Mobility Transistor
NRZ	Non Return to Zero
NTT	Nippon Telegraph and Telephone Corporation
mmWave	Millimeter Wave
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OOK	On Off Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PAN	Personal Area Network
PDM	Polarization Division Multiplexing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SBD	Schottky Barrier Diode
SiGe	Silicon-Germanium
SNR	Signal to Noise Ratio
THz	Terahertz
UHD	Ultra-High Definition
UTC-PD	Uni-Traveling Carrier Photo-Diode
VR	Virtual Reality
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Specialty Networks

[참고문헌]

[1] Shiwei Wang al., "26.8-m THz wireless transmission of probabilistic shaping 16-QAM-OFDM signals," APL Photonics, vol.5, no.5, pp. 56105, 2020

[2] Carlos Castro et al., "100 Gbps Real-Time Transmission over a THz Wireless Fiber Extender Using a Digital-Coherent Optical Modem," OFC 2020, M4I2, San Diego, CA, 2020.

[3] S. Jia et al., "Integrated Dual-DFB Laser for 408 GHz Carrier Generation Enabling 131 Gbit/s Wireless Transmission over 10.7 Meters," OFC 2019, Th1C.2, San Diego, CA, 2020.

[4] K. Liu et al., "100 Gbit/s THz Photonic Wireless Transmission in the 350-GHz Band With Extended Reach," IEEE Photonics Technology Letters (30), 2018.

[5] Kathirvel Nallappan et al., Live Streaming of Uncompressed HD and 4K Videos Using Terahertz Wireless Links," IEEE Access, vol.6, pp. 58030, 2018.

[6] X. Li et al., "120 Gbps Wireless Terahertz-Wave Signal Delivery by 375GHz-500GHz Multi-Carrier in a 2×2 MIMO System," OFC 2018, M4J.4, San Diego, CA, 2018.

[7] M. F. Hermelo et al., "Spectral efficient 64-QAM-OFDM terahertz communication link," Optics Express vol.25, no.16, pp. 19360, 2017.

[8] X. Pang et al., "Single Channel 106 Gbps 16QAM Wireless Transmission in the 0.4 THz Band," OFC 2017, Tu3B.5, Los Angeles, CA, 2017.

[9] Sang-Rok Moon et al., "Demonstration of photonics-aided terahertz wireless transmission system with using silicon photonics circuit," Optics Express, vol.28, no.17, pp. 24918, 2020.

[10] Sang-Rok Moon et al., "Cost-effective photonics-based THz wireless transmission using PAM-N signals in the 0.3 THz band," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, early access, 2020. (https://ieeexplore.ieee.org/document/9234591)

[11] Pedro Rodr´ıguez-V´azquez et al., "Optimization and Performance Limits of a 64-QAM Wireless Communication Link at 220-260 GHz in a SiGe HBT Technology," 2019 Radio and Wireless Symposium.

[12] Iulia Dan et al., "A Superheterodyne 300 GHz Wireless Link for Ultra-Fast

Terahertz Communication Systems," 2019 49th European Microwave Conference (EuMC)

[13] Sangyeop Lee et al., "An 80-Gbps 300-GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.54, no.12, pp. 3577, 2019.

[14] Mohamed Hussein Eissa et al., "Frequency Interleaving IF Transmitter and Receiver for 240-GHz Communication in SiGe:C BiCMOS," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.68, no.1, pp. 239, 2020.

[15] Hiroshi Hamada1 et al., "300-GHz, 100-Gbps InP-HEMT Wireless Transceiver Using a 300-GHz Fundamental Mixer," IEEE Microwave Theory and Techniques Society, International Microwave Symposium, 2018.

[16] P. R. Vazquez et.al. "Towards 100 Gbps: A Fully Electronic 90 Gbps One Meter Wireless Link at 230 GHz", European Microwave Conference (EuMC) 2018, :1389-1392 November 2018.

[17] Pedro Rodríguez-Vázquez et al., "A 65 Gbps QPSK one meter wireless link operating at a 225–255 GHz tunable carrier in a SiGe HBT technology," 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)

[18] Mohamed Hussein Eissa et al., "Wideband 240-GHz Transmitter and Receiver in BiCMOS Technology With 25-Gbit/s Data Rate," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.53, no.9, pp. 2532, 2018.

[19] Kyoya Takano et al., "A 105Gbps 300GHz CMOS transmitter" 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 308-309, 2017.

[20] T. Harter al., "Generalized Kramers–Kronig receiver for coherent terahertz communications," Nature Photonics, vol. 14, PP. 601, 2020