

테라헤르츠 통신 - 집적회로 기반 시연 사례 -

나윤식 · Zubair Mehmood ·

서문교

성균관대학교

I. 서 론

스마트폰 · 가상현실 기기 등 개인용 무선기기의 보편화 와 고화질 미디어 전송 · 클라우드 서비스 활성화 등으로 초 고속 무선 통신의 수요는 갈수록 증가하고 있으며, [그림 1] 에서 보듯이 가까운 미래에 수십 Gbps급 또는 그 이상의 전 송율이 요구될 것으로 예상된다. 테라헤르츠파(terahertz) 대 역은 밀리미터파 대역과 비교하여 상대적으로 대역폭이 넓 어서 수십 Gbps 이상의 차세대 초고속 무선 통신에의 응용 가능성이 높다. 특히, 100~300 GHz 대역은 자유 공간 경로 손실이 0.1 dB/m 이하로 비교적 낮으면서도 현재의 상용 반 도체 기술로 RF 프론트엔드의 구현이 가능한 주파수 대역 이란 점에서 많은 주목을 받고 있다.

본 논문에서는 최근 집적회로 기반 테라헤르츠 대역 송 수신 RF 프론트엔드(이하 “송수신기”라 칭함) 관련 연구 중, 100 GHz 이상 주파수 대역의 실제 유 · 무선 통신 시연 사례를 살펴봄으로써 최근 연구 동향을 파악하고자 한다. 온 웨이퍼(on-wafer) 프로브 측정만으로 성능 평가가 가능한 개별 단위 회로와는 달리, 채널을 포함한 통신 시연을 위해

서는 광대역 저손실 안테나 구현, 칩 · 안테나 인터페이스, 패키징 등 현재 기술 기준에서 도전적인 문제들을 해결해야 한다.

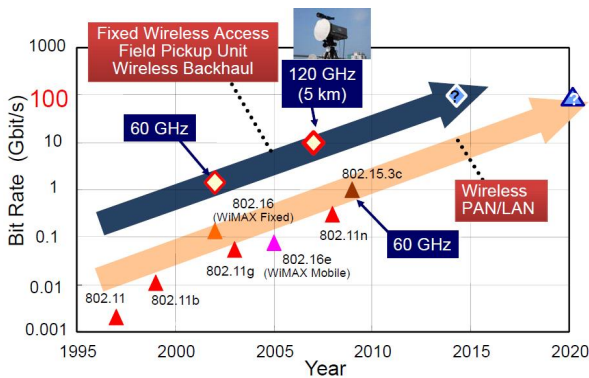
위 조건하에서 집계된 사례는 모두 21건으로 <표 1>에 정리하였다. 100~165 GHz^{[1]~[7]}, 210~260 GHz^{[8]~[13]}, 300 GHz^{[14]~[20]} 및 410 GHz^[21] 등의 주파수 대역을 사용하였다. 통신 거리는 온 칩 · 온 보드 안테나를 사용한 경우, 수 cm, 고이득 외부 안테나를 사용한 경우 170 m에 이르며, 5 Gbps 부터 105 Gbps까지의 전송율을 시연하였다. OOK나 QPSK 등의 단순 변조 방식뿐만 아니라, 16-QAM · 32-QAM 등의 고차 변조도 사용하였다. 송수신기 칩은 CMOS · SiGe 등의 실리콘 반도체 공정 혹은 InP-HBT · InP-HEMT 등의 화합물 반도체 공정으로 제작되었다. 송수신기 전체가 모듈화된 사 례도 있고, 시연의 편의상 온 웨이퍼(on-wafer) 환경을 이용 한 사례도 있다. 대표 시연 사례들에 대하여 다음 장에서 조 금 더 자세히 살펴본다.

II. 통신 시연 사례

2-1 칩 간 · 모듈 간 · 보드 간 근거리 무선 통신

수 cm 이내의 근거리 무선 통신은 스마트폰 · 랩탑 · 태블릿 PC · 고화질 TV 등의 기기 내부에서 칩 간(chip-to-chip) · 모듈 간(module-to-module) · 보드 간(board-to-board) 초고속 무선 통신에 응용될 수 있다^{[1][4][6][8][11][13][16][17][18][20]}. 온 칩 안테나를 사용하여 1 cm 거리에서 210 GHz 대역 10.7 Gbps OOK^[8], 2 cm 거리에서 240 GHz 대역 16 Gbps QPSK^[11], 4 cm 거리에서 260 GHz 대역 10 Gbps OOK의 무선 전송을 시연하였다^[13]. 외부 혼(horn) 안테나를 사용하여 5 cm의 거리에서 300 GHz 대역 56 Gbps 16-QAM 전송을 구현하였다.^[17]

2-1-1 210 GHz 대역 10.7 Gbps OOK 무선 통신^[8]



[그림 1] 초고속 근거리 무선통신의 수요(출처: Tadao Nagatsuma, “Present and Future of Terahertz Comm”)

<표 1> 집적회로 기반 테라헤르츠파 대역 통신 시연 사례

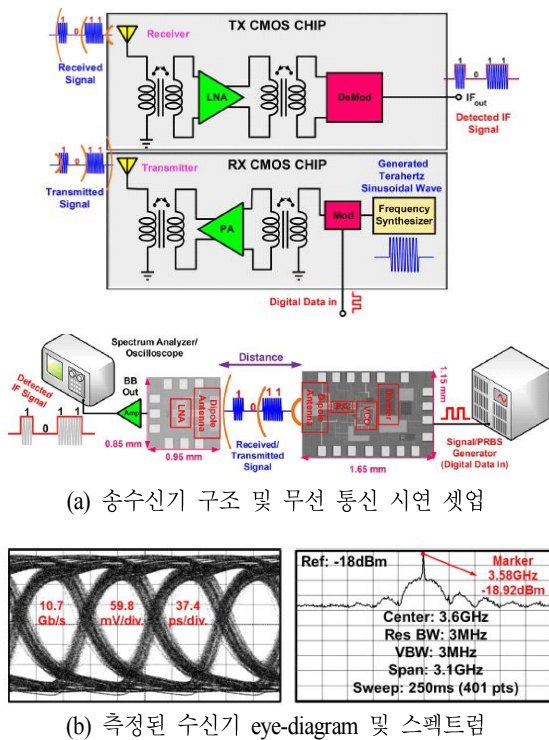
Ref.	Year	Tech.	Mod	Fcarrier	Rate (Gbps)	Distance	TX/RX	Channel
[1]	2014	65 nm CMOS	OOK	100 GHz	7.6 Gbps	1 cm	TX, RX	Air
[2]	2013	InP-HEMT	QPSK	120 GHz	10 Gbps	170 m	TX, RX	Air
[3]	2013	40 nm CMOS	OOK	130 GHz	11 Gbps	3 m	TX, RX	Air
[4]	2012	40 nm CMOS	OOK	135 GHz	10 Gbps	10 cm	TX, RX	Air
[5]	2016	InP-HBT	QPSK	140 GHz	48 Gbps	1.8 m	TX, RX	Air
[6]	2014	130 nm SiGe	QPSK	140 GHz	10 Gbps	-	TX, RX	Loopback
[7]	2018	65 nm CMOS	OOK	165 GHz	12.1 Gbps	4.62 cm	TX, RX	Dielectric
[8]	2015	40 nm CMOS	OOK	210 GHz	10.7 Gbps	1 cm	TX, RX	Air
[9]	2011	mHEMT	OOK	220 GHz	25 Gbps	50 cm	TX, RX	Air
[10]	2016	130 nm SiGe	QPSK	240 GHz	23.205 Gbps	15 cm	TX, RX	Air
[11]	2015	65 nm CMOS	QPSK	240 GHz	16 GHz	2 cm	RX	Air
[12]	2014	mHEMT	8-PSK	240 GHz	96 GHz	40 cm	TX, RX	Air
[13]	2012	65 nm CMOS	OOK	260 GHz	10 GHz	4 cm	TX, RX	Air
[14]	2018	65 nm CMOS	QPSK	300 GHz	30 Gbps	-	TX	Loopback
[15]	2018	InP-HEMT	16-QAM	300 GHz	100 Gbps	2.22 m	TX, RX	Air
[16]	2017	40 nm CMOS	32-QAM	300 GHz	105 Gbps	-	TX	Loopback
[17]	2017	40 nm CMOS	16-QAM	300 GHz	56 Gbps	5 cm	TX	Air
[18]	2017	40 nm CMOS	16-QAM	300 GHz	32 Gbps	1 cm	RX	Air
[19]	2016	InP-HEMT	OOK	300 GHz	20 Gbps	1 m	TX, RX	Air
[20]	2014	InP-HBT	QPSK	300 GHz	50 Gbps	-	TX, RX	Loopback
[21]	2018	28 nm CMOS	OOK	410 GHz	5 Gbps	13 cm	TX	Dielectric

40 nm CMOS 기반 210 GHz OOK 송수신기 및 온 칩 안테나를 이용하여 1 cm 거리에서 10^{-12} 이하의 비트 오류(Bit Error Rate: BER)로 10.7 Gbps 무선 통신을 시연하였다([그림 2]). OOK 송신기는 3.8 %의 주파수 조정 범위를 가지는 트리플 푸쉬(triple-push) 구조의 위상 동기 루프, 캐스코드 기반 변조기, 중립화(neutralized) 4단 전력 증폭기로 이루어지며, 측정된 EIRP는 +6.8 dBm이다. OOK 수신기는 21.7 dB의 최대 이득을 가지는 8-단 중립화 저잡음 증폭기 및 포락선 검파기(envelope detector)로 이루어졌다. 송수신기 칩은 421 mW를 소모한다. 온 칩 다이폴 안테나의 이득 및 효율은 각각 -0.1 dBi 및 31 %이다.

2-1-2 240 GHz 대역 16 Gbps QPSK 무선 통신^[11]

65 nm CMOS 기반 240 GHz QPSK 송수신기 칩 및 온 칩

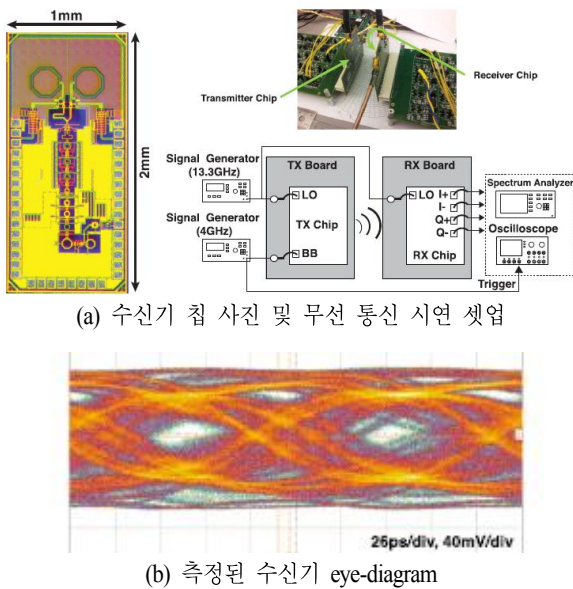
안테나를 이용하여 2 cm 거리에서 10^{-4} 의 BER로 16 Gbps 무선 통신을 시연하였다([그림 3]). 송신기에서는 먼저 낮은 주파수의 기준 신호로부터 80 GHz까지 다단 주입고정식(injection-locked) 발진기로 주파수를 체배한다. 80 GHz 국부 발진(local Oscillator: LO) 신호는 QPSK 변조 후 Class-E 증폭기를 거치고, 최종적으로 3체배기를 통하여 240 GHz로 상향 변환된다. 수신기에서도 비슷한 방식으로 240 GHz LO를 생성한 후, 초단의 저잡음 증폭기 없이 I-Q 주파수 변환기로 바로 QPSK 복조를 수행한다. 송신기의 측정된 EIRP는 +1 dBm 이고, 전력 소모는 220 mW이다. 수신기의 잡음 지수와 변환 이득은 각각 15 dB와 25 dB로 측정되었고, 260 mW를 소모한다. 온 칩 안테나는 차동 슬롯 루프(slotted loop)의 형태로 설계하였고, 실리콘 기판의 두께를 조절하여 방사 패턴, 이득, 효율 등을 최적화하였다. 설계된 온 칩 안테나의



(a) 송수신기 구조 및 무선 통신 시연 셋업

(b) 측정된 수신기 eye-diagram 및 스펙트럼

[그림 2] 210 GHz 대역 10.7 Gbps OOK 시연^[8]



(a) 수신기 칩 사진 및 무선 통신 시연 셋업

(b) 측정된 수신기 eye-diagram

[그림 3] 240 GHz 대역 16 Gbps QPSK 시연^[11]

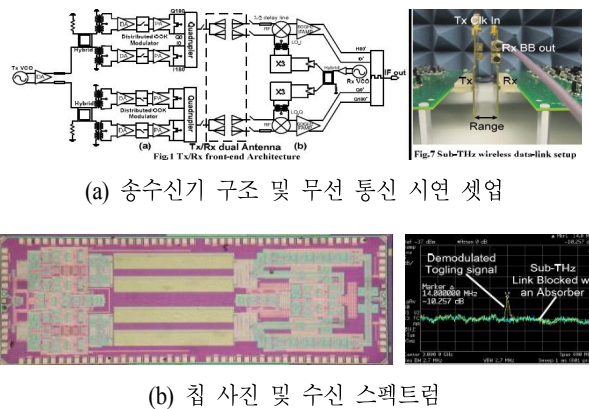
이득 및 효율은 각각 1.55 dBi 및 14 % 이고, 30 GHz의 대역폭을 가진다.

2-1-3 260 GHz 대역 10 Gbps OOK 무선 통신^[13]

하나의 칩에 집적된 65 nm CMOS 기반 260 GHz OOK 송수신기 및 안테나를 이용하여 4 cm 거리에서 10 Gbps 무선 통신을 시연하였다(그림 4). 송신기의 60 GHz 차동 부고조파(sub-harmonic) LO를 두 개의 90° 하이브리드로 네 개의 위상으로 나눈다. 각 신호는 분산된 스위치와 증폭기로 OOK 변조된 뒤, 4위상(quadrature) 4체배기를 통하여 240 GHz 송신 변조 신호를 형성한다. 수신기 입력 신호는 평형(balanced) 타입의 주파수 변환기로 *I*-band 대역 IF로 하향 변환된 후 4위상(quadrature) 방식의 포락선 검파기로 OOK 복조된다. 송수신기는 하나의 온 칩 광대역 누설파(leaky wave) 안테나를 공유하며, 이는 칩 면적의 감소로 이어진다. 안테나는 동등한 효율을 갖는 패치형 안테나보다 5~6배 넓은 대역폭을 갖게끔 설계되었으며, 4.5 dBi의 이득, 26.3 %의 효율 및 30 GHz의 대역폭 특성을 보인다. 송신기는 688 mW를 소모하며, +5 dBm의 EIRP를 출력하고, 수신기의 전력소모는 485 mW이다.

2-2 칩 간 유전체 도파관 통신

저손실 유전체 도파관(dielectric waveguide)은 근거리 칩 간 통신을 위한 인터커넥트(interconnect)로 쓰일 수 있다. 유전체 도파관을 이용한 칩 간 통신은 별도의 추가적인 공정이 필요하다는 단점이 있으나, 도체 손실(conductor loss)이 없어서 금속 배선 기반 전송선보다 테라헤르츠파 대역에서 신호 손실이 상대적으로 낮고, 또한 무선 통신 대비 현저히 낮은 경로 손실 특성을 가진다^{[7][14][21]}. 퀴츠(quartz) 기판에 제작된



(a) 송수신기 구조 및 무선 통신 시연 셋업

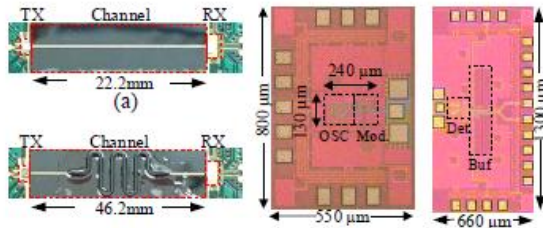
(b) 칩 사진 및 수신 스펙트럼

[그림 4] 260 GHz 대역 10 Gbps QPSK 시연^[13]

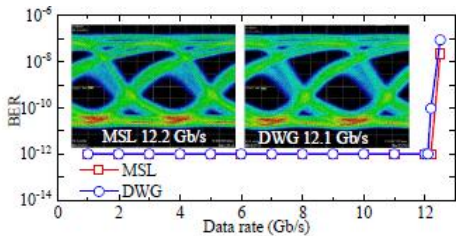
4.62 cm 길이의 실리콘 유전체 도파관으로 165 GHz 12.1 Gbps OOK 전송을 시연했고^[7], 13 cm 길이의 PTFE 유전체 도파관에서 410 GHz 5 Gbps OOK 전송을 시연하였다^[21].

2-2-1 165 GHz 대역 12.1 Gbps OOK 유전체 도파관 통신^[7]

쿼츠(quartz) 기판에 제작된 4.62 cm 길이의 실리콘 유전체 도파관과 65 nm CMOS 기반 165 GHz 송수신기 칩을 이용하여 10^{-12} 이하의 BER로 12.1 Gbps OOK 전송을 시연했다(그림 5). 송신기 칩은 변압기로 결합된 교차 결합(cross-coupled) 기본 주파수(fundamental) 발진기와 스위치 기반 OOK 변조기로 구성되었다. 송신기의 출력 전력, 효율, on-off 비율은 각각 0.66 dBm, 10.6 %, 30 dB로 측정되었다. 수신기 칩은 공통 모드 잡음 제거를 위한 의사 차동(pseudo-differential) 구조의 포락선 검파기 및 5-단 제한 증폭기(limiting amplifier)로 구성된다. 유전체 도파관은 100 μ m 두께의 쿼츠 기판에 고저항 실리콘으로 마이크로머시닝(micro-machining) 공정을 이용하여 제작하였다. 제작된 도파관의 손실은 0.04 dB/mm로 측정되었다. 송수신 칩과 유전체 도파관은 125 μ m 길이의 본딩 와이어로 연결되었다. 송수신기 전력 소모는 10 Gbps와 12.1 Gbps 전송 시 각각 3.2 mW와 15.6 mW이고, 에너지 효율(energy efficiency)은 각각 0.32 pJ/bit와 1.29 pJ/bit로 타 시연 대비 우수하다.



(a) 좌: 유전체 도파관, 우: 송수신기 칩 사진

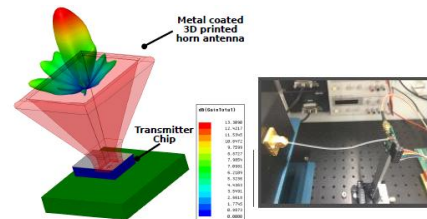


(b) 수신기 eye-diagram

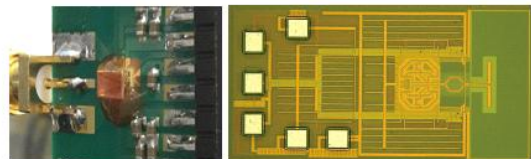
[그림 5] 165 GHz 대역 12.1 Gbps OOK 시연^[7]

2-2-2 410 GHz 대역 5 Gbps OOK 유전체 도파관 통신^[21]

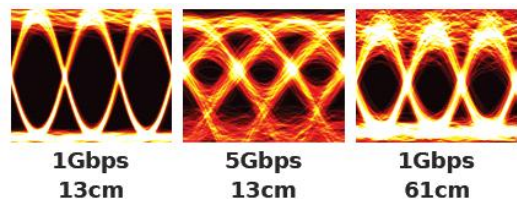
28 nm CMOS 기반 410 GHz OOK 송신기 칩과 3-D 프린터로 제작한 혼(horn) 안테나를 이용하여 13 cm 길이의 유전체 도파관으로 5 Gbps 전송을 시연하였다(그림 6). 송신기 칩은 트리플 푸쉬(triple-push) 방식의 발진기로 410 GHz 신호를 생성하고, 디지털 입력에 따라 발진기의 바이어스 전압을 조정함으로써 OOK 변조를 수행한다. 변조된 신호는 온 칩 차동 다이폴 안테나로 방사함으로써 칩 상부에 위치한 혼(horn) 안테나를 급전(feed)한다. 혼 안테나는 3-D 프린터로 제작하였고, 금속 코팅이 되어 있으며, $2,760 \times 2,160 \mu$ m의 구경(aperture)을 갖고 있다. 온 칩 피드(feed) 안테나를 포함한 혼(horn) 안테나의 이득은 13.3 dB이고, 송신기 EIRP는 -3.99 dBm으로 측정되었다. 통신 시연을 위하여 13 cm 길이의 PTFE 유전체 도파관 끝을 테이퍼링(tapering)하여 혼 안테나에 삽입하였다. 도파관을 통과한 신호는 상용 수신기 모듈로 10 GHz로 하향 변환하고, 고속 오실로스코프로 획득(acquisition) 후 소프트웨어상에서 복조하였다.



(a) 좌: 칩·안테나 인터페이스, 우: 무선 통신 시연 셋업



(b) 좌: 송신기 모듈, 우: 송신기 칩 사진



(c) 수신 eye-diagram

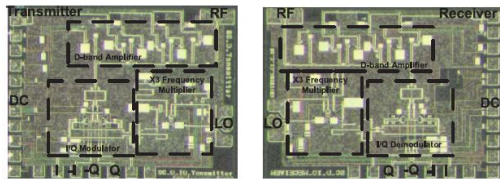
[그림 6] 410 GHz 대역 5 Gbps OOK 시연^[21]

2-3 실내 무선 통신

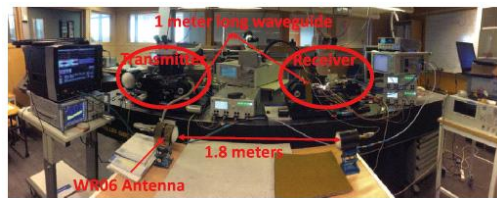
랩탑·스마트폰으로부터 고화질 모니터로의 미디어 전송^{[3][5][9][15]}, 키오스크(kiosk)^[19] 다운로드 등 실내(indoor) 기기 간 초고속 무선 전송을 위해서는 통신 거리를 수 m 정도로 확장할 필요가 있다. 3 m 거리에서 130 GHz 대역 11 Gbps OOK^[3], 1.8 m 거리에서 140 GHz 대역 48 Gbps QPSK^[5], 2.22 m 거리에서 300 GHz 대역 100 Gbps 16-QAM 전송을 시연하였다^[15]. 300 GHz OOK 송수신 모듈을 이용하여 1 m 거리에서 20 Gbps를 전송하였다^[19].

2-3-1 140 GHz 대역 48 Gbps QPSK 무선 통신^[5]

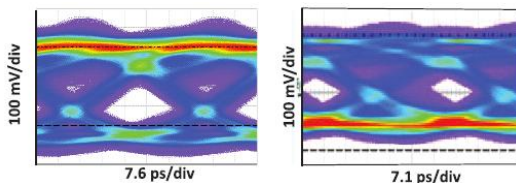
고속 InP-HBT 공정 기반 140 GHz 대역 QPSK 송수신기 칩을 이용하여 1.8 m 거리에서 2.3×10^{-3} 의 BER로 48 Gbps 무선 통신을 시연하였다(그림 7). 송신기 칩은 LO 3-체배기, 위상 변위기, I/Q 변조기, 3-단 증폭기로 구성된다. 송신기 칩은 165 mW를 소모하며, 단측파대(single-sideband) 이득 및 포화 출력 전력은 각각 25 dB와 +9 dBm로 측정되었다. 수신기 칩은 I/Q 복조기를 제외하면 송신기와 동일한 단위



(a) 송수신기 칩 사진



(b) 무선 통신 시연 셋업



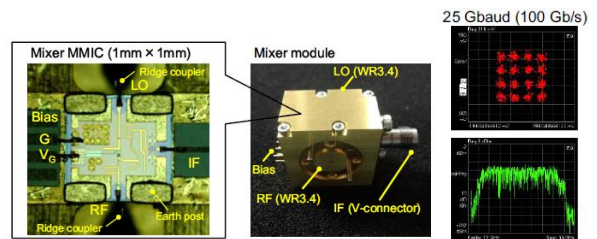
(c) 수신 eye-diagram(좌: 44 Gbps, 우: 48 Gbps)

[그림 7] 140 GHz 대역 48 Gbps QPSK 시연^[5]

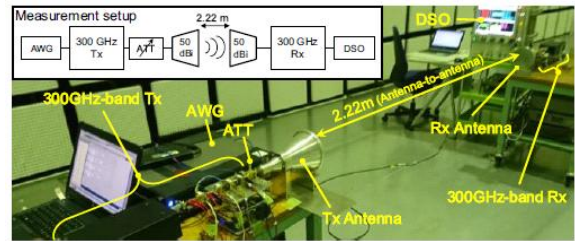
회로를 사용하나, 초단 광대역 증폭기의 바이어스는 저 잡음 지수 특성에 맞게 조절하였다. 수신기 칩은 192 mW를 소모하며, 변환 이득과 잡음 지수는 각각 26 dB과 9 dB로 측정되었다. 통신 시연 시, 기저 대역 I/Q 신호는 임의파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator: AWG)로 생성하였다. 수신기 출력은 고속 오실로스코프로 획득 후 신호 처리를 거쳐 BER 등을 계산하였다. 통신 거리가 1.8 m로 경로 손실이 상당히 높아서 송수신 모두 40 dBi 고이득 혼 안테나를 사용하였다.

2-3-2 300 GHz 대역 100 Gbps 16-QAM 무선 통신^[15]

고속 HEMT 기반 300 GHz 대역 도파관 모듈을 이용하여 2.22 m의 거리에서 100 Gbps 무선 통신을 시연하였다(그림 8). 100 Gbps의 목표 전송율을 달성하기 위해서, 적절한 수준의 신호대 잡음비(16.5 dB)와 RF 대역폭(25 GHz)이 요구되는 16-QAM 방식을 채택했다. 선형성이 좋은 HEMT 기반 저항성(resistive) 주파수 변환기 구조를 채택하였고, RF와 IF 간의 분리도(isolation)가 충분히 크게끔 임피던스 정합회로를 설계하였다. 주파수 변환기의 변환 손실은 약 15 dB로 측정되었다. 제작된 주파수 변환기 칩은 도파관 모듈 형태로 패키징하였고, 전력 증폭기, 저잡음 증폭기, LO 체배기 등 다른 도파관 모듈과 함께 송수신 시스템을 구성하였다.



(a) 좌: 주파수 변환기 모듈, 우: 수신된 16-QAM 신호



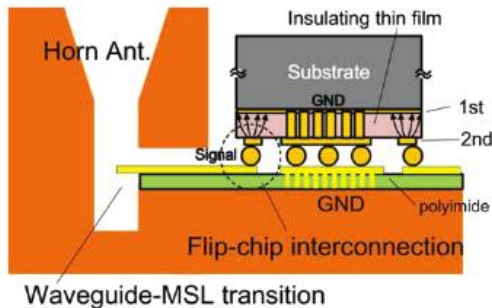
(b) 무선 통신 시연 셋업

[그림 8] 300 GHz 대역 100 Gbps 16-QAM 시연^[15]

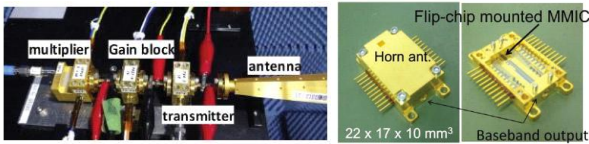
송신기의 16-QAM IF 신호는 AWG에서 생성하였고, 수신기의 IF 출력은 고속 오실로스코프를 사용하여 복조하였다. 상당히 높은 경로 손실을 보상하기 위하여 송수신 모두 50 dBi 고이득 혼 안테나를 사용하였다.

2-3-3 300 GHz 대역 20 Gbps OOK 무선 통신^[19]

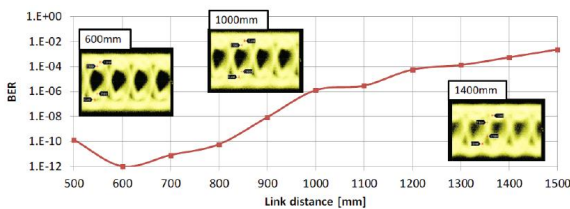
키오스크 다운로드 시스템용으로 개발된 300 GHz OOK 송수신 모듈을 이용하여 1 m 거리에서 10^{-6} 이하의 BER로 20 Gbps 무선 전송을 시연하였다(그림 9). 고속 HEMT 기반 진행파(travelling-wave) OOK 변조기와 전력 증폭기를 하나의 칩으로 집적하였고, LO 체배기·증폭기 모듈, 30 dBi 혼 안테나와 함께 송신기를 구성하였다. 전력 증폭기의 최대 포화 출력은 10 dBm이다. 수신기 칩은 고속 HEMT 기반 6-단 저잡음 증폭기, Schottky 다이오드 포락선 검파기, 기저대역 3-단 증폭기로 구성하였고, 16 dBi 혼 안테나와 함께 하나의 모듈로 패키징하였다.



(a) 칩과 안테나 간의 인터페이스



(b) 좌: OOK 송신기, 우: OOK 수신기



(c) 수신 BER 및 eye-diagram

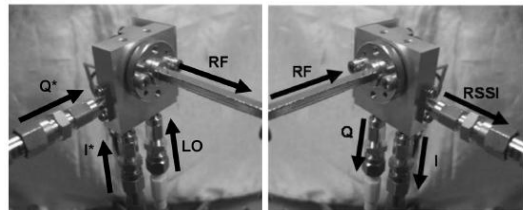
[그림 9] 300 GHz 대역 20 Gbps OOK 시연^[19]

2-4 중·장거리 무선 통신

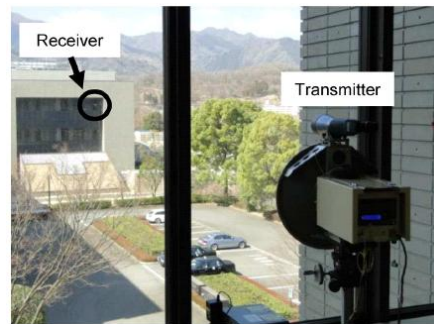
테라헤르츠파 대역은 넓은 대역폭으로 인하여 수백 m 에서 수 km에 이르는 중·장거리 통신에도 응용 잠재력이 있다. 점대점(point-to-point) 무선 통신에 사용되어 기존 밀리미터파 링크 대비 전송율 확장이 가능하고, 광통신망의 “last mile” 링크를 대체하여 망 구축비용 절감 및 재난 시 우회경로 제공 등의 장점을 제공할 수 있다. 170 m 거리에서 120 GHz 대역 10 Gbps QPSK^[2], 40 m 거리에서 240 GHz 대역 96 Gbps 8-PSK 무선 전송을 구현하였다.^[12]

2-4-1 120 GHz 대역 10 Gbps QPSK 무선 통신^[2]

10-Gbit Ethernet 망의 “last mile” 무선 전송용으로 개발된 120 GHz QPSK 송수신기를 이용하여 170 m 떨어진 두 빌딩 간 10 Gbps로 한 시간 동안 무오류(error-free) 무선 통신 시연을 하였다(그림 10). 송신기는 인코더 보드, 고속 HEMT 기반 QPSK 송신 모듈 및 전력 증폭기 모듈, 도파관 대역통과 필터 등으로 구성되었다. 송신기의 포화 출력은 15 dBm으로 측정되었다. 수신기는 고속 HEMT 기반 QPSK 수신 모듈 및 디코더 보드 등으로 구성되었다. 반송파 재생(carrier recovery)이 필요 없는 차동(differential) 방식 QPSK의 채택으



(a) 좌: QPSK 송신 모듈, 우: QPSK 수신 모듈



(b) 무선 통신 시연 셋업

[그림 10] 120 GHz 대역 10 Gbps QPSK 시연^[2]

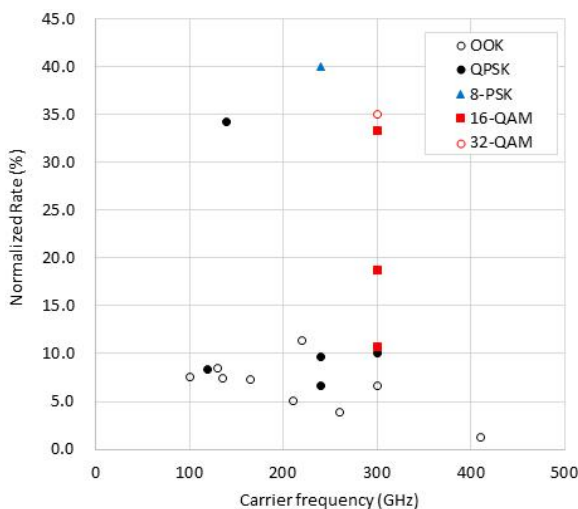
로 수신기 복잡도를 경감하였다. 매우 높은 경로 손실을 보상하기 위하여 송수신 모두 49 dBi 고이득 카세그레인(Cassegrain) 안테나를 사용하였다. 루프백(loopback) 시연으로 측정된 수신기 출력 신호 대 잡음비에 따르면 개발된 120 GHz QPSK 시스템은 2 km 거리에서 10 Gbps 전송이 가능한 성능을 가진 것으로 파악된다.

2.5 변조 방식 간 시연된 스펙트럼 효율 비교

OOK · QPSK 등의 단순 변조 방식은 8-PSK · QAM 등의 고차 변조와 비교하여 송수신기 구조가 간단하고 회로의 선형성이나 위상잡음에 영향을 상대적으로 적게 받는 장점이 있으나, 주어진 RF 대역폭에서 최대 전송율이 낮은 단점을 가진다. 각 변조 방식의 시연된 스펙트럼 효율을 비교하기 위하여, “정규화된 전송율(normalized rate)”을 무선 전송율과 RF 반송파 주파수의 비율로 정의하였다.

$$Normalized\ Rate = \frac{Rate}{f_{carrier}} (\%)$$

일반적으로 변조 방식의 스펙트럼 효율은 전송율과 RF 대역폭의 비율로 정의되나, 참고 문헌 상에서 RF 대역폭이 명확하지 않은 경우가 많아 편의상 RF 반송파 주파수로 정규화하였다. [그림 11]에서 보듯이 QPSK의 정규화된 전송율의 평균은 약 10% 수준으로, 예상대로 OOK 보다 높으나,



[그림 11] 변조 방식별 시연된 정규화된 전송율

8-PSK · 16-QAM · 32-QAM보다 낮음을 알 수 있다. 타 QPSK 시연 대비 약 세배 가량 효율이 좋은 QPSK 사례가 있고(34%), 32-QAM보다 효율이 우수한 8-PSK 사례(40%)가 관찰되는데, 이는 해당 송수신 프론트엔드의 RF 비 대역폭(fractional bandwidth)이 비교적 넓기 때문으로 여겨진다.

III. 결 론

본 논문에서는 집적회로 기반 RF 프론트엔드를 이용한 100 GHz 대역 이상의 최근 유 · 무선 통신 시연 사례를 살펴 보았다. 매우 높은 주파수에서의 프론트엔드 회로 설계 및 시스템 통합(integration)의 어려움을 proof-of-concept 프로토타입 혹은 그 이상 수준의 해법으로 극복하여 테라헤르츠 대역 통신 시스템 구현의 가능성(feasibility) 및 유용성은 충분히 증명했다고 보인다. 향후 테라헤르츠 통신의 상용화를 위해서는 저전력 광대역 프론트엔드 설계 기술, 광대역 고 효율 안테나 기술, 저손실 · 저가 패키징 기술, 저전력 아날로그-디지털 변환 기술, 시나리오별 채널 모델링 기술 등에 관한 지속적인 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] K. Nakajima, A. Maruyama, M. Kohtani, T. Sugiura, E. Otobe, J. Lee, S. Cho, K. Kwak, J. Lee, T. Yoshimasu, and M. Fujishima, "23 Gbps 9.4 pJ/bit 80/100 GHz band CMOS transceiver with on-board antenna for short-range communication", *2014 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, KoaHsiung, 2014, pp. 173-176.
- [2] T. Kosugi, A. Hirata, J. Takeuchi, K. Murata, and N. Kukutsu, "120-GHz-band fully integrated wireless link using QSPK for realtime 10-Gbit/s transmission", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 12, pp. 4745-4753, Dec. 2013.
- [3] K. Katayama, M. Motoyoshi, K. Takano, L. C. Yang, and M. Fujishima, "209 mW 11 Gbps 130 GHz CMOS transceiver for indoor wireless communication", *2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, Singapore, 2013, pp. 409-412.

- [4] N. Ono, M. Motoyoshi, K. Takano, K. Katayama, R. Fujimoto, and M. Fujishima, "135 GHz 98 mW 10 Gbps ASK transmitter and receiver chipset in 40 nm CMOS", *2012 Symposium on VLSI Circuits (VLSIC)*, Honolulu, HI, 2012, pp. 50-51.
- [5] S. Carpenter, D. Nopchinda, M. Abbasi, Z. He, M. Bao, T. Eriksson, and H. Zirath, "A D-Band 48-Gbit/s 64-QAM/QPSK direct-conversion I/Q transceiver chipset", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 4, pp. 1285-1296, Apr. 2016.
- [6] S. Foulon, S. Pruvost, D. Pache, C. Loyez, and N. Rolland, "A 140 GHz multi-gigabits self-heterodyne transceiver for chip-to-chip communications", *2014 44th European Microwave Conference*, Rome, 2014, pp. 901-904.
- [7] B. Yu, Y. Ye, X. Ding, C. Neher, X. Liu, Z. Xu, and Q. Gu, "Sub-THz interconnect for planar chip-to-chip communications", *2018 IEEE 18th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*, Anaheim, CA, 2018, pp. 54-56.
- [8] S. Moghadami, F. Hajilou, P. Agrawal, and S. Ardalan, "A 210 GHz fully-integrated OOK transceiver for short-range wireless chip-to-chip communication in 40 nm CMOS technology", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 737-741, Sep. 2015.
- [9] I. Kallfass, J. Antes, T. Schneider, F. Kurz, D. Lopez-Diaz, S. Diebold, H. Massler, A. Leuther, and A. Tessmann, "All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 477-487, Nov. 2011.
- [10] N. Sarmah, P. R. Vazquez, J. Grzyb, W. Foerster, B. Heinemann, and U. R. Pfeiffer, "A wideband fully integrated SiGe chipset for high data rate communication at 240 GHz", *2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, London, 2016, pp. 181-184.
- [11] S. V. Thyagarajan, S. Kang, and A. M. Niknejad, "A 240 GHz fully integrated wideband QPSK receiver in 65 nm CMOS", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 10, pp. 2268-2280, Oct. 2015.
- [12] F. Boes, T. Messinger, J. Antes, D. Meier, A. Tessmann, A. Inam, and I. Kallfass, "Ultra-broadband MMIC-based wireless link at 240 GHz enabled by 64GS/s DAC", *2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Tucson, AZ, 2014, pp. 1-2.
- [13] J. Park, S. Kang, S. V. Thyagarajan, E. Alon, and A. M. Niknejad, "A 260 GHz fully integrated CMOS transceiver for wireless chip-to-chip communication", *2012 Symposium on VLSI Circuits (VLSIC)*, Honolulu, HI, 2012, pp. 48-49.
- [14] Q. Zhong, Z. Chen, N. Sharma, S. Kshattray, W. Choi, and K. K. O, "300-GHz CMOS QPSK transmitter for 30-Gbps dielectric waveguide communication", *IEEE Custom Integrated Circuit Conference (CICC)*, San Diego, CA, 2018, pp. 1-4.
- [15] H. Hamada, T. Fujimura, I. Abdo, K. Okada, H.-J. Song, H. Sugiyama, H. Matsuzaki, and H. Nosaka, "300-GHz 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300-GHz fundamental mixer", *2018 International Microwave Symposium (IMS)*, pp. 1480-1483.
- [16] K. Takano, S. Amakawa, K. Katayama, S. Hara, R. Dong, A. Kasamatsu, I. Hosako, K. Mizuno, K. Takahashi, T. Yoshida and M. Fujishima, "A 105 Gb/s 300 GHz CMOS transmitter", *IEEE International Solid-State Circuit Conference (ISSCC)*, San Francisco, CA, 2017, pp. 308-309.
- [17] K. Takano, K. Katayama, S. Amakawa, T. Yoshida, and M. Fujishima, "56-Gbit/s 16-QAM wireless link with 300-GHz-band CMOS transmitter", *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, HI, 2017, pp. 793-796.
- [18] S. Hara, K. Katayama, K. Takano, R. Dong, I. Watanabe, N. Sekine, A. Kasamatsu, T. Yoshida, S. Amakawa, and M. Fujishima, "A 32 Gbit/s 16 QAM CMOS receiver in 300 GHz band", *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, HI, 2017, pp. 1703-1706.
- [19] H. Hamada, T. Kosugi, H. Song, H. Matsuzaki, A. Moutaouakil, H. Sugiyama, M. Yaita, T. Tajima, H. Nosaka, O. Kagami, Y. Kawano, T. Takahashi, Y. Nakasha, N. Hara, K. Fujii, I. Watanabe, and A. Kasamatsu, "20-Gbit/s ASK

wireless system in 300-GHz-band and front-ends with InP MMICs", *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP- RASC)*, Seoul, 2016, pp. 326-329.

[20] H. Song, J. Kim, K. Ajito, N. Kukutsu, and M. Yaita, "50-Gb/s direct conversion QPSK modulator and demodulator MMICs for terahertz communications at 300 GHz", *IEEE*

Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 62, no. 3, pp. 600-609, Mar. 2014.

[21] A. Standaert, P. Reynaert, "A 410 GHz OOK transmitter in 28 nm CMOS for short distance chip-to-chip communications", *2018 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, Philadelphia, PA, 2018, pp. 240-243.

≡ 필자소개 ≡

나 윤 식



2014년 2월: 충북대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)
2014년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석박사통합과정
[주 관심분야] RF Circuit Design

서 문 교



1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 12월: University of California, Santa Barbara, CA USA (공학박사)
2013년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수
[주 관심분야] 밀리미터파 / 테라헤르츠파 회로 설계

Zubair Mehmood



2007년 11월: Baluchistan University of Information Technology, Pakistan, Engineering and Management Sciences, Department of Electronics Engineering (공학사)
2012년 2월: University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan, Department of Electrical Engineering (공학석사)

2008년 9월~현재: University of Gujrat, Pakistan, Department of Electrical Engineering 강사

2016년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] 밀리미터파 / 테라헤르츠파 회로 설계