

테라헤르츠 대역의 주파수를 이용한 근거리 무선통신시스템 응용기술 동향

Terahertz Technologies for Short-Range Communication System Applications
Utilizing Terahertz Carrier Frequency

정태진 (T.J. Chung)	인지무선연구팀 책임연구원
이원희 (W.H. Lee)	인지무선연구팀 선임연구원
윤대영 (D.Y. Youn)	인지무선연구팀 위촉연구원
김종호 (J.H. Kim)	스펙트럼공학연구팀 책임연구원

목 차

-
- I. 서론
 - II. THz 전파특성 및 옥내 채널 모델
 - III. THz 무선통신시스템 연구동향
 - IV. RF 송수신 부품/MMIC 개발동향
 - V. 결론

* 본 연구는 지식경제부 및 방송통신위원회의 정보통신 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2009-F-037-01, 테라헤르츠 대역 전파환경 및 무선전송 플랫폼 기술연구]

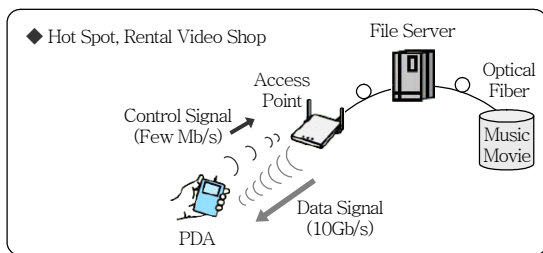
현재 주목을 받고 있는 테라헤르츠 대역의 주파수를 이용한 무선통신시스템 응용기술 동향에 대하여 기술한다. 테라헤르츠 대역은 전자파 스펙트럼에서 밀리미터파 대역과 원적외선 대역의 중간에 위치하는 100GHz~10THz 사이의 주파수이다. 현재 시점에서 10년 이내에 약 15Gbps의 데이터 속도가 필요할 것으로 판단되며, 10Gbps 이상의 전송속도를 실현하기 위해서는 기존의 밀리미터파에서 사용하는 주파수 대역폭 보다 더 넓은 대역폭이 필요하며, 이 대역폭을 얻기 위해서는 테라헤르츠 주파수 대역으로 자연스럽게 옮겨가지 않을 수 없다. 본 고에서는 테라헤르츠 대역의 전파 특성, 가용 주파수 대역과 무선통신시스템 응용을 위한 옥내 채널 모델, 테라헤르츠 무선통신시스템 연구동향, RF 송수신기 핵심부품 및 MMIC 기술개발 동향을 소개하고자 한다.

I. 서론

테라헤르츠(THz)파는 전자파 스펙트럼에서 밀리미터파 대역과 원적외선(far infrared) 대역 사이에 존재하는 100GHz에서 10THz 대역의 전자파 스펙트럼으로서, 소자 및 부품 등 관련 기술이 미개발되거나 개발중인 미개척 주파수 대역이다. 테라헤르츠 대역의 전자파는 수증기 등 대기의 수분에 강하게 흡수되며, 플라스틱, 나무, 종이, 옷감 등 비이온화 물질은 투과하고 금속에는 반사하는 특성을 가지고 있다[1].

지난 30년간을 관찰해 본 결과, 무선 데이터 속도의 지수적 성장을 감안하면 무선의 전송용량은 매 1.5년마다 2배씩 증가해 왔으며, 현재 시점에서 10년 이내에 약 15Gbps의 데이터 속도가 필요할 것으로 판단되며, 초고속 통신기술의 발전으로 데이터 전송속도는 유선 통신시스템의 용량에 접근할 것이다[2].

대표적인 응용 분야로는 SAN 응용 등을 위한 초고속 대용량 파일전송, 10Gbit Ethernet(10GbE)과 초고속 데이터 전송을 위한 광 화이버 네트워크의 무선 대체, HDTV 및 미래 Ultra-HDTV의 비압축(uncompressed) 고품질 비디오 신호의 무선전송을 들 수 있다. 일본은 Ultra-HDTV를 2015년 방송 표준으로 제정한다는 계획을 발표했다[3]. 이 Ultra-HDTV는 33메가 픽셀(7,680×4,320)의 해상도를 가지며, 비압축 비디오 스트림 전송을 위하여 24Gbps의 전송 속도가 요구된다. (그림 1)은 PDA를 통한 초고속 대용량 파일전송 응용 예를 나타낸다[4].



(그림 1) 초고속 대용량 파일전송 응용 예[4]

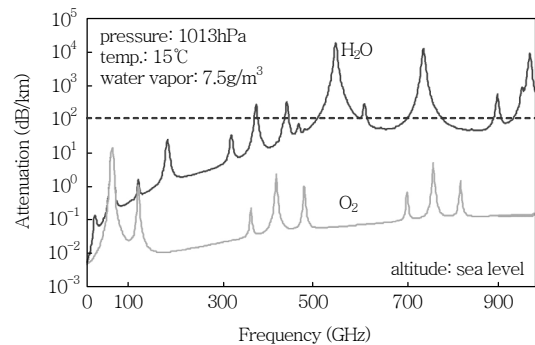
미래 무선통신 시스템의 기가비트급 전송속도는 대단히 넓은 주파수 대역폭(10GHz 이상)을 요구하는 다양한 분야에 응용될 것으로 기대된다.

기존의 WLAN, WPAN 및 UWB 시스템은 수 MHz에서 수 GHz 사이의 주파수 대역폭을 사용한다. 따라서, 이들은 미래의 요구사항을 만족하는 충분히 높은 데이터 속도를 제공할 수 없으며, 향후 무선 근거리 통신네트워크는 조만간 테라헤르츠 주파수 대역으로 이동할 것으로 예측된다. 테라헤르츠 대역은 기존의 밀리미터파에서 가용한 통신 대역폭 보다 훨씬 넓은 대역폭을 제공할 수 있어 아주 매력적이다. 300GHz 이상의 주파수는 현재 FCC에서 조정되고 있지 않다.

본 고에서는 100~1,000GHz 범위에 대한 테라헤르츠 대역의 전파 특성, 주파수 원도, 가용 대역폭 및 옥내 전파(propagation) 채널 모델에 대하여 기술하고, 이와 더불어 테라헤르츠 대역의 무선통신시스템 개발동향, RF 송수신기 핵심부품 및 MMIC의 기술개발 동향을 소개하고자 한다.

II. THz 전파특성 및 옥내 채널 모델

테라헤르츠 대역의 전파는 대기에 존재하는 산소(O₂)와 수증기(H₂O)에 의해 주로 흡수되어 특정 주파수에서 감쇠량이 대단히 크게 나타난다. (그림 2)는 ITU-R P.676-7 모델[5]을 이용하여 해발 고도에서 지구의 평균 대기상태, 즉 대기압이 1013hPa,



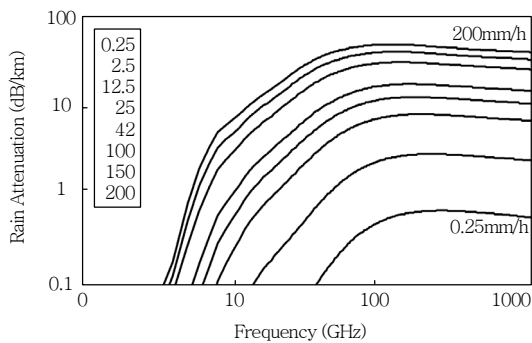
(그림 2) 지구 평균 대기 상태에서 산소 및 수증기에 의한 대기 감쇠특성

〈표 1〉 주파수 원도 및 가용 대역폭

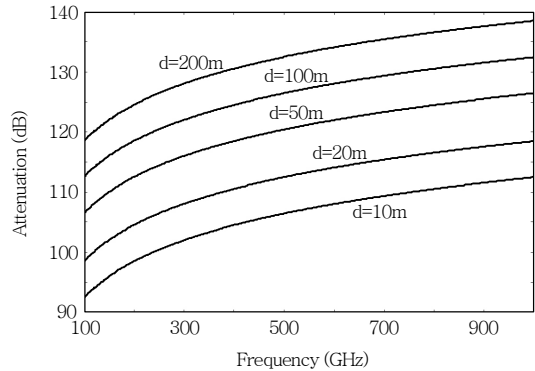
도파관 대역	주파수 원도 (GHz)	가용 대역폭 (GHz)	중심 주파수 (GHz)	감쇠량 (dB/km)
WR-8	90~140	50	115	1.05
WR-6	110~170	60	140	0.92
WR-5	140~220	36	156	1.31
		28	206	2.46
WR-4	170~260	68	226	4.46
WR-3	220~325	90	265	3.38
		48	299	4.90
WR-2	325~500	45	348	9.40
		46	412	17.10
WR-1.5	500~750	66	665	56.40
WR-1	750~1000	85	851	52.50

온도 15°C, 수증기 밀도 7.5g/m³에서 1~1,000GHz의 주파수에 따른(1GHz 간격) 산소와 수증기에 의한 감쇠량(dB/km)을 나타낸 것이다. 산소에 의한 감쇠가 가장 크게 발생하는 주파수는 60GHz 대역으로 감쇠량은 약 15.5(dB/km)이고, 그 이외의 피크 감쇠량은 수증기에 의한 감쇠량보다 무시할 정도로 낮다. 건조한 대기(dry air)에서는 수증기 밀도는 제로이고, 주로 산소 및 기타 가스에 의한 감쇠가 발생한다. 도파관 주파수 대역을 기준으로 주파수 원도와 가용한 대역폭은 <표 1>과 같다.

옥외 응용시스템인 경우, 테라헤르츠 대역은 강우에 의한 감쇠가 크게 발생하여 무선링크의 가용도(availability)를 저하시키는 요인으로 작용한다. (그림 3)은 ITU-R P.838-3[6]의 모델을 이용하여 수평 편파의 경우 주파수에 함수로 시간 당 강우량(mm/hr)에 대한 감쇠특성(dB/km)을 나타낸 것이다. 맨 아래



(그림 3) 주파수에 따른 강우 감쇠량



(그림 4) 주파수 및 거리에 따른 자유공간 손실

의 곡선은 시간 당 강우량이 0.25mm/hr일 때이고, 강우량이 증가할수록 감쇠량도 증가한다. 수직 편파의 경우, 수평 편파와 거의 같은 감쇠특성을 보인다.

자유공간의 거리에 따른 전파 감쇠량은 대기 감쇠(산소, 수증기) 및 강우 감쇠보다 대단히 커서 근거리 통신 응용인 경우 자유공간 손실로만 감쇠량을 예측해도 무방하다. (그림 4)는 주파수의 함수로 거리에 따라 자유공간 손실을 나타낸 것이다. 캐리어 주파수 및 송신기와 수신기 간의 거리가 2배 증가하면 감쇠량은 6dB씩 증가한다.

테라헤르츠 대역에서의 채널 모델은 기존의 낮은 밀리미터파 대역의 다중경로 NLOS 환경과는 달리 고지향성 안테나를 사용하는 LOS 환경이다. 다중경로에 의한 전파는 실내 공간의 벽면, 천정, 바닥 및 가구 등에 의한 반사로 인해 LOS 신호에 비해 크기가 아주 작아서 채널 모델링에서 의미있는 다중경로(significant multipath)로 작용하지 못할 것이다.

고지향성 안테나의 3dB 빔 폭이 15°이하이면 다중경로 성분은 송신기의 전파 방향과 같은 방향으로부터 수신기에 도달한다[7]. 이 경우 다중경로는 송신기와 수신기의 빔 폭 내에서 LOS와 평행한 오프셋 위치의 물체에 의해 한 번 반사된 파(single reflection)와

〈표 2〉 건물 재질에 따른 평균 반사손실, RL(dB)[7]

건물재질	TE 편파	TM 편파	Max@TE	Max@TM
유리	4.6	11.1	7.2	35.1
목재	11.7	18.4	17.5	42.5
콘크리트	5.7	12.5	8.9	36.7

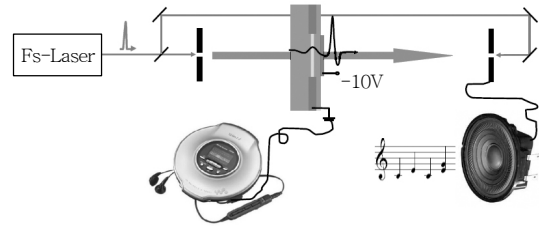
LOS 경로와 수직인 옥내의 두 벽면 중 적어도 하나의 벽면이 도체인 경우 두 번 반사된 파(double reflection)에 의한 것 뿐이다. <표 2>는 옥내의 건물 재질에 따른 평균 반사손실(RL)을 나타낸다[8].

테라헤르츠 대역의 옥내 전파 채널모델은 자유 공간 경로 손실과 PDP로부터 구할 수 있다. 여기서 중요한 파라미터는 평균 지연 및 RMS 지연 확산(delay spread)이다. RMS 지연확산은 ISI에 크게 영향을 미쳐 통신시스템의 BER 성능을 좌우한다.

다중경로에 의한 지연시간은 주파수에 무관하고, 실내공간의 크기에 따라 달라지며, 반사파의 크기는 건물 재질의 파워 반사계수 및 반사파의 경로 길이에 따라 변하는데 반사계수는 캐리어 주파수의 함수이므로 PDP 모델은 주파수의 함수로 표현될 수 있다.

III. THz 무선통신시스템 연구동향

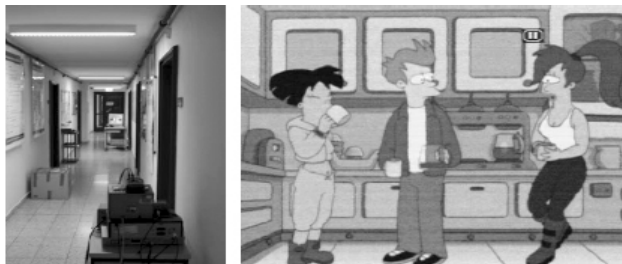
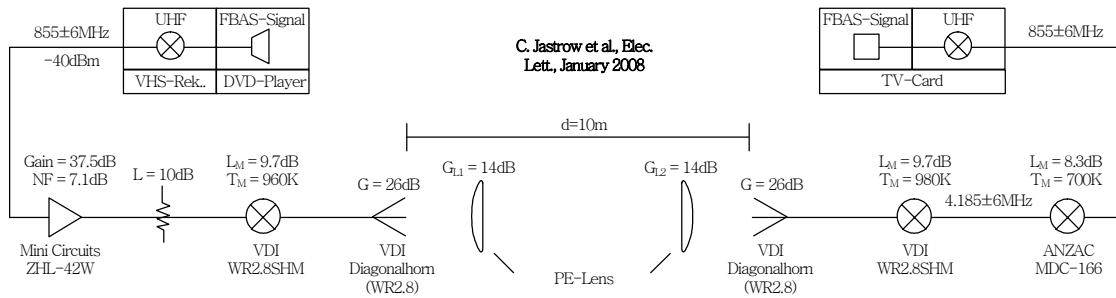
테라헤르츠 대역의 주파수를 이용한 최초의 무선 전송 실험은 2004년 독일의 Braunschweig 대학에서 수행되었다[9]. 적외선광의 펄스 레이저 펄스(femto-sec laser pulse)를 GaAs 크리스탈에 조사하여 테라헤르츠 신호를 발생시키고(100GHz~1THz),



(그림 5) THz 주파수를 이용한 최초의 무선전송 시연 사례[9]

오디오 CD 플레이어의 전기신호를 테라헤르츠 빔으로 인코딩하여 최대 1m 거리까지 전송하고, 전송된 빔을 안테나를 통하여 디코딩한 후 스피커에 신호를 전달하여 FM 음악방송을 들을 수 있었다(그림 5 참조). 본 실험은 테라헤르츠 무선통신 시스템 개발의 초기 단계에 불과하지만 수 m 거리의 LOS 무선 전송 가능성을 제시했다는 데에 의미를 두고 있다.

테라헤르츠 무선전송 실험을 계기로 Braunschweig 대학에 테라헤르츠 통신실험실(TCL)을 개설하여 본격적인 연구에 착수하였다[10]. 10Gbps급 이상의 전송속도에서 HDTV 등 디지털 비디오 신호전송을 목표로 연구개발의 첫 단계에서는 옥내 통신을 위한 주요 부품 및 관련기술에 대한 3가지 프로젝트를 수행하고 있다. 주요 연구내용은 첫째로, 빌딩의 재료 특성 등 테라헤르츠 전파에 영향을 미치는 요



TV signal, transmitted over a distance of 10m

(그림 6) 300GHz 캐리어 주파수를 이용한 아날로그 비디오 신호전송 시연 사례[4]

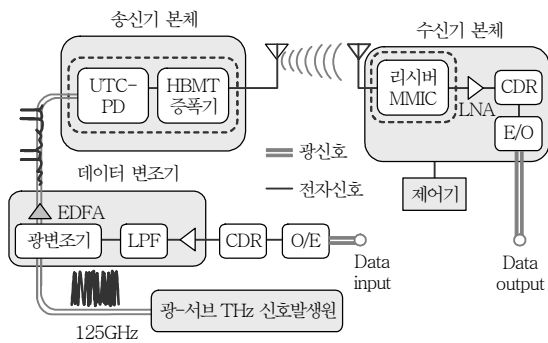
소들을 규명하기 위하여 레이트레이싱(ray-tracing) 시뮬레이션을 통한 채널 특성에 관한 기초 연구이고, 둘째로, 테라헤르츠 주파수 영역에서 동작하는 송신기, 수신기, 변조기 및 반사기 개발이며, 마지막으로 60GHz 신호전송시스템 모델을 개발하고 이를 300GHz 시스템 설계로 확장하는 것이다. 300GHz 대역에서 아날로그 비디오 신호 전송실험을 수행하여 10m 거리에서 DVD 플레이어의 아날로그 비디오 신호를 PC 내장 표준 TV 카드로 전송된 영상을 재현하였다(그림 6) 참조[11].

일본의 NTT는 2005년 낮은 테라헤르츠 대역의 주파수인 125GHz 대역을 이용하여 옥외에서 10Gbps HDTV 비디오 신호 전송 시연을 하였고(그림 7) 참조, 전송거리는 200m였다. 초기에 개발된 시스템은 송신기에 광학기술을 적용하였다. 포토 믹싱 방법으로 낮은 테라헤르츠의 캐리어 신호를 발생시키고, 10Gbps의 데이터 신호를 ASK 변조방식에 의해 광의 강도(intensity)를 변조한 후 광 증폭기로 증폭하고 광전변환(O/E)을 통하여 안테나로

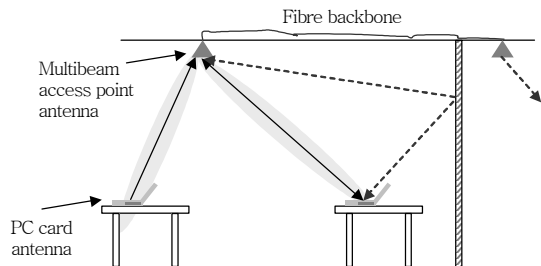
전송된다. 수신기는 모두 전자방식(all electronic)으로 구성되고 envelop 검출방식으로 복조기능을 한다. 최근, 광전방식의 송신기는 모두 전자소자로 구성된 MMIC 칩을 개발하였다[12]-[14].

호주의 CSIRO ICT 센터는 600GHz 대역에서 옥내 무선 LAN 시스템의 연구 사례를 소개하였다[15]. 옥내에서 광 화이버 백본에 연결된 다중빔 접속점 안테나와 PC 카드 안테나 간의 테라헤르츠 대역 통신으로 실내 공간에 위치한 PC 간의 네트워크를 구성하는 형태이다(그림 8) 참조. 전송거리는 5~10m이고, 접속점(access point)의 안테나 이득은 30dBi, PC 카드 안테나는 16dBi이다. 출력 전력은 1mW(0dBm)이고, 수신 대역폭은 캐리어 주파수의 6.7%인 40GHz이며, 변조방식은 BPSK를 고려했다. 무선링크 시뮬레이션 결과, BER이 10^{-12} 일 때 5m에서는 데이터 속도가 15Gbps이고, 10m에서는 4Gbps의 시뮬레이션 결과를 얻었다.

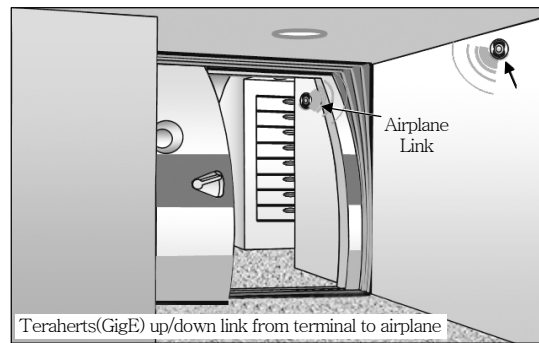
IEEE 802.15 WPAN THz-IG에서는 2008년 IGthz(Interest Group)를 결성하여 테라헤르츠 대



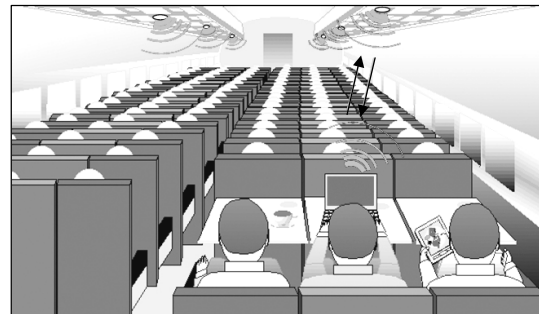
(그림 7) 125GHz 대역에서 10Gbps 데이터 전송을 위한 송수신기 구성도[14]



(그림 8) THz Wireless LAN Application(예)[15]



(a) 터미널과 항공기간 THz 상/하향 무선링크

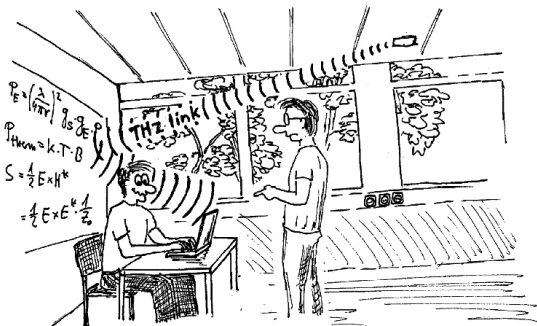


(그림 9) 항공기에서의 기가비트 이더넷(GbE) 무선통신 예

역에서 무선통신의 가능성(feasibility)을 탐구하는 연구에 착수하였다[16]. IGthz의 관심사는 300~600GHz 대역의 시스템 응용을 위하여 차단주파수(f_T)가 충분히 큰 트랜지스터가 머지않은 장래에 개발될 것으로 판단하고 있으며, 이를 이용한 RF 부품이 개발되어 시스템 서비스에 적용될 것으로 기대하고 있고, 또한 테라헤르츠 전파의 대기흡수 특성과 주파수 분배 등에 대한 분야에도 관심을 가지고 있다. (그림 9)는 항공기에서 테라헤르츠파의 비간섭 특성을 이용한 기가비트 이더넷 통신 응용의 예를 나타낸다[17].

테라헤르츠 대역의 단거리(~10m) 무선통신시스템에 대한 연구는 현재 Braunschweig 대학을 중심으로 독일이 가장 활발한 연구결과를 보이고 있다. 이들이 저널에 발표한 논문의 대다수는 옥내 통신시스템에 적용하기 위한 채널모델 및 시스템 레벨의 무선링크 시뮬레이션 연구가 주류를 이루고 있다 [18]-[23]. 이들의 주 관심 주파수는 300GHz 및 350GHz 대역이며, 이 대역에서 가용한 대역폭은 47GHz로 계산하였다. 특히, 실내 다중경로 환경에서 NLOS를 극복하기 위하여 테라헤르츠 미러(mirror)[24],[25]를 이용하여 실내의 벽면으로부터 반사되는 “Directed NLOS” 개념을 제안하였다. (그림 10)은 사람이 테라헤르츠 링크를 차단하는 경우 벽면의 반사파를 이용하는 NLOS 통신 개념도이다.

또한 독일의 Fraunhofer IAF에서는 200GHz 이상에서 동작하는 LNA, Mixer 등 RF 핵심 MMIC를 개발하고 있다[26],[27]. 이 RF MMIC들은 테라헤

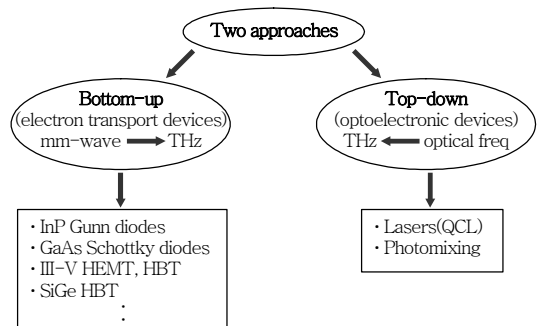


(그림 10) 무선링크 차단시 THz 미러를 이용한 NLOS 통신 개념도[4]

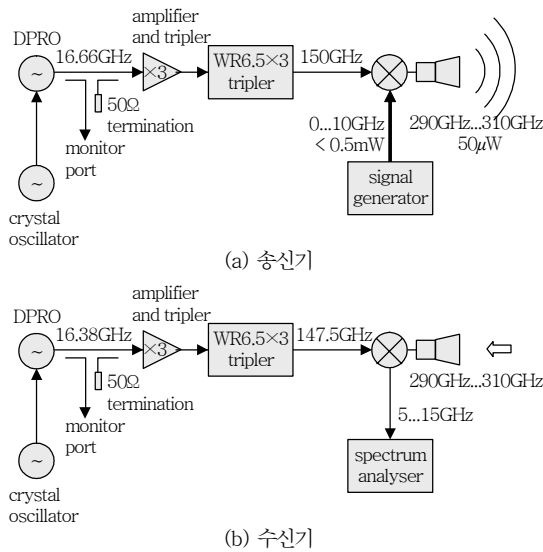
르츠 대역에서 레이더, 이미징, 통신 등에 응용된다. 현재의 기술수준을 고려해 볼 때 G-대역(140~220 GHz) 및 H-대역(220~325GHz)의 RF MMIC 핵심 부품은 5년 이내에 상용화될 것으로 기대되며, 이를 이용한 초고속(10Gbps급 이상) 무선전송 시스템이 개발될 것으로 생각된다.

IV. RF 송수신 부품/MMIC 개발 동향

테라헤르츠 대역의 주파수는 RF 측면에서 보면 너무 높고, 광 측면에서는 너무 낮아서 LO 신호를 발생시키는 방식에 따라 상향 접근법(bottom-up)과 하향 접근법(top-down) 두 가지로 구분된다(그림 11) 참조). 상향 접근법은 기존의 낮은 밀리미터 파 대역에서 개발된 발진기와 증폭기 부품을 이용하여 체배기(multiplier)를 통해 높은 주파수의 연속파 신호를 발생시키는 방법으로, 체배기의 효율은 출력 주파수에 따라 10~30% 수준이어서 믹서의 LO 입력에 충분한 신호 전력을 공급하는 데 다소 제약이 있다. 반면, 하향 접근법은 높은 광 주파수를 헤테로 다인 포토 믹싱(photo-mixing)[12]-[14] 등의 방법으로 주파수를 낮추어 테라헤르츠 대역에서의 연속파 신호를 발생시키는 방법으로, 출력 전력은 수십 μ W 정도이어서 테라헤르츠 대역에서의 통신 응용에는 부적합하다[8]. (그림 12)는 현재의 기술수준에서 구현할 수 있는 송신기와 수신기의 전형적인



(그림 11) THz 송수신 시스템 구성을 위한 상향 및 하향 접근방식



(그림 12) THz 전자방식 송신기 및 수신기 구성도[11]

구성도이다[11].

RF 송수신 핵심부품으로는 국부발진기(LO), 믹서(mixer), 전력증폭기(PA), 저잡음증폭기(LNA), 필터, 안테나 등이다. 본 장에서는 현재 선진 각국에서 개발하고 있는 HEMT, HBT 등 능동소자를 이용한 RF 송수신 MMIC의 개발 현황 및 주요 성능을 조사 분석하였다.

1. 능동소자 기술

테라헤르츠 대역에서의 믹서, 주파수 체배기 등의 RF 부품은 쇼트키 다이오드를 이용한 수동부품이 주류를 이루어 왔으나, 최근에는 HBT, HEMT 등의 능동소자로 기술발전이 이루어지고 있다. G-대역(140~220GHz) 및 H-대역(220~325GHz)의 능동소자가 개발됨에 따라 종전에 수동소자로 실현하기 불가능했던 LNA, PA, LO 등의 MMIC 칩을 개발하는 단계에 이르렀다. RF MMIC 제작을 위한 능동소자의 중요한 파라미터는 차단주파수(cutoff frequency) f_T 와 최대 공진주파수 f_{max} 이다.

미국의 Northrop Grumman은 50nm InP HEMT 소자로 $f_{max} = 1\text{THz}$ 이상을 실현하였으며, 이 소자를 이용하여 340GHz에서 15dB 이득을 갖는 LNA

<표 3> MHEMT 게이트 길이에 따른 f_T, f_{max} [26]

Gate Length	100nm	50nm	35nm
$f_T(\text{GHz})$	220	380	515
$f_{max}(\text{GHz})$	300	500	>700

를 구현하였다[28]. 독일의 Fraunhofer IAF가 개발한 50nm Metamorphic HEMT(MHEMT) 소자는 f_T 와 f_{max} 가 375GHz이고, 이를 이용하여 192~235GHz 대역에서 15dB 이득의 LNA MMIC를 개발하였다[27]. 또한 동 기관에서는 35nm MHEMT 소자를 개발하여 270~310GHz 대역에서 소신호 이득 15dB를 얻었으며, 게이트 길이에 따른 f_T 와 f_{max} 는 <표 3>과 같다[26].

2. 안테나 기술

옥외 점대점(PTP) 무선링크에서는 일반적으로 강우 감쇠를 고려하여 수 km 거리에서 원하는 통신 성능을 얻기 위해서 고지향성이며 물리적으로 크기가 큰 안테나를 사용하고 있으나, 옥내의 WPAN 시스템에서의 안테나는 고속 데이터 전송 성능을 만족하는 수준에서 저가격으로 충분한 이득을 얻는 것이 중요한 관점이다. NLOS 환경에서 기가비트급 데이터 속도를 달성하기 위하여 간단한 채널 모델을 사용했을 때 안테나 이득은 20dBi 정도가 요구된다[29]. 테라헤르츠 대역에서 사용되는 안테나 형태로는 도파관 안테나, 평면 안테나(printed plane), 온 칩(on-chip) 안테나가 있으며, 손실을 최소화하려면 도파관 안테나를 사용한다.

옥내 통신에 적합한 상용 안테나로는 패치 어레이 안테나와 표준 혼 안테나가 주로 사용되며, 100~1,000GHz 대역에서 안테나 이득은 패치 어레이 안테나는 16dBi, 혼 안테나는 20~26dBi 정도이고[30], 3dB 빔폭은 10° 정도이다. 이보다 높은 안테나 이득이 필요한 경우는 안테나 개구면에 렌즈를 부착하여 평행빔을 만들어 줌으로써 이득의 증대 효과를 얻을 수 있다. [11]은 직경이 5cm, 초점거리 12cm인 폴리에틸렌 렌즈로 14dB의 추가 이득을 얻었다.

3. LNA MMIC

통신 응용을 위한 LNA의 성능은 낮은 잡음지수(NF), 높은 증폭률(gain) 및 10~20GHz 대역폭에서 평탄한 이득 특성을 가져야 한다. 현재 G-밴드(140~220GHz)와 H-밴드(220~325GHz) 대역의 LNA 개발이 활발히 추진되고 있으며, LNA 성능은 이득 15~20dB, 잡음지수 5~8dB 정도이다. <표 4>는 현재 개발되어 칩 레벨에서 측정된 LNA의 성능을 요약하였다.

<표 4> 개발된 LNA의 성능 요약

주파수 대역(GHz)	Gain(dB)	NF(dB)	참고문헌
180~220	16	4.8	[26]
110~170	15@160GHz	4.0	[31]
140~220	21@220GHz	8.0	[31]
270~310	15	-	[26]
220~325	16@340GHz	-	[32]
216~238	18	8.3	[33]
180~200	16	4.8	[34]
192~235	15	-	[27]

4. Mixer MMIC

Mixer의 주요 성능은 낮은 LO 전력 입력과 낮은 변환 이득(conversion gain) 및 낮은 잡음지수 등이다. FET 등의 소자를 사용하는 능동믹서는 기존의 쇼트키 다이오드 등을 사용하는 수동 믹서에 비해 낮은 변환손실과 잡음지수(NF) 성능을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 LO의 입력전력이 낮아지는 장점을 가진다. 테라헤르츠 대역에서는 현재 기본파 믹서(fundamental mixer) 보다도 서브하모닉 믹서(SHM)가 보편적으로 많이 사용된다. 이는 LO 입력 주파수가 높기 때문에 이에 대한 부담을 줄여주기

<표 5> 개발된 서브하모닉 믹서 성능 요약

주파수 대역 (GHz)	Conversion Gain(dB)	NF(dB)	참고문헌
165~220	-10~-4.7	-	[26]
265~400	-10~-8.0	9.95	[29]
170~260	-8.7~-8.0	7.35	[29]
180~210	-14~-8.5	-	[35]
165~220	> -10	-	[34]

위함이며, 2차 서브하모닉 믹서는 LO 주파수가 RF 주파수의 1/2이다. 쇼트키 다이오드를 사용하는 수동 서브하모닉 믹서는 변환손실이 약 10dB 정도로 높은 편이다. <표 5>는 현재 개발된 서브하모닉 믹서의 성능을 요약하였다.

5. PAMMIC

전력증폭기의 주요 성능은 광대역(~20GHz)에서 높은 전력 이득(power gain)과 높은 출력 전력(>10 dBm)이 요구된다. 최근의 연구동향을 살펴보면 InP를 기반으로 하는 전력용 HEMT 소자에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다[36].

이 소자의 성능은 상온에서 $f_T = 343\text{GHz}$, $f_{\text{max}} = 600\text{GHz}$ 이다. 94GHz에서 게이트 길이와 폭에 따라 ~50mW 출력 전력, 이득 4~6dB, PAE 21~33%의 결과를 얻었다. 이 결과는 단일 소자만을 사용하였을 때 측정한 결과이다. 그러나, 캐리어 주파수가 200GHz 이상으로 올라가면 10mW 이상의 출력을 얻는 데는 한계가 있다. [37]은 단일 소자를 사용했을 때 323~326GHz 대역에서 측정된 이득은 4.8dB \pm 1dB이고, 324GHz에서 4.8dB 이득을 보였다. 여기서 사용한 소자는 250nm InP DHBT을 사용하였으며, $f_T = 375\text{GHz}$, $f_{\text{max}} = 550\text{GHz}$ 였고, 포화전력은 330GHz에서 $P_{\text{sat}} = 7\text{mW}(8.4\text{dBm})$, PAE = 14.5%이다.

6. LO 및 주파수 체배기

LO 신호발생기는 주파수 상향 및 하향변환을 위한 캐리어 주파수 발생기로서 믹서의 LO 포트에 신호를 공급하며, 주요 성능 파라미터는 위상잡음(phase noise), 주파수 안정도(ppm) 및 출력 전력(dBm)이다. 100GHz 이상의 주파수 대역에서는 보편적으로 LO 신호발생은 낮은 주파수 대역의 기 개발된 높은 출력 전력을 갖는 증폭기 모듈을 사용하여 주파수 체배기를 통해 LO 신호를 발생시킨다. 믹서의 변환손실은 LO 신호의 전력이 클수록 작아지는 경향이 있기 때문에 주파수 체배기 입력 전력은 충분히 커

야 한다. 현재 믹서의 LO 입력 전력은 1mW 이상으로 주파수에 따른 주파수 체배기의 효율 10~30% 정도를 고려하면 주파수 체배기 입력 전력은 10mW 이상이 되어야 한다. 따라서, LO 체인에서 중요한 요소는 주파수 체배기의 효율이다. 즉, 높은 출력 주파수에서 높은 체배율과 높은 효율이 요구된다. 현재 수준의 기술로는 2 체배기(X2)의 경우 200GHz에서 입력 전력이 230mW일 때 CW 출력 전력은 70mW이며, 이는 약 30%의 효율에 해당한다[38]. 400GHz에서 2 체배기의 효율은 14%, 1.2THz에서 3 체배기의 효율은 0.7% 정도이다[39].

V. 결론

테라헤르츠 대역의 대기 전파특성을 고려해 볼 때 무선통신 응용에 유망한 주파수 대역은 220GHz, 300GHz, 350GHz로 볼 수 있다. 이 대역에서 가용한 주파수 대역폭은 각각 68GHz, 48GHz, 45GHz

이다. 이러한 넓은 대역폭을 이용하여 스펙트럼 효율이 낮은 변조방식으로도 10Gbps 이상의 데이터 속도를 용이하게 얻을 수 있다.

또한, 테라헤르츠 대역의 통신 응용은 옥내 근거리 무선전송에 적합하고, 옥외 점대점 통신응용은 현재의 능동소자 기술과 RF MMIC 기술의 상용화 한계로 충분한 출력 전력을 얻을 수 없어 먼 미래에 실현될 가능성을 남겨두고 있다.

테라헤르츠 대역의 전자파를 이용한 무선통신 송수신기 기술의 핵심은 RF front-end를 구성하는 LNA, Mixer, LO, PA 등 능동소자로 이루어지는 MMIC 기술과 안테나, 필터, 접속부품 등 수동부품 기술의 개발에 좌우된다. 따라서, 핵심 RF MMIC의 기반기술 개발이 시급하며, 아울러 송수신기의 시스템 기술에 대한 연구도 지속적으로 추진되어야 한다.

약어 정리

● 용어해설 ●

THz(Terahertz): Tera는 10^{12} 의 단위를 말한다. 일반적으로 THz 주파수 스펙트럼은 밀리미터파 대역인 100GHz에서 원적외선(far infrared) 영역인 10THz까지를 말한다. 파장으로 말하면 3~0.03mm로서 1mm 이하인 경우 THz파를 서브밀리미터파(sub-millimeter wave)라고도 부른다. THz파는 전자파의 투과성과 광파의 직진성을 동시에 가지고 있으며, 금속 물체에 반사하고 플라스틱, 나무, 종이 등 비이온화 물질에서는 투과한다. X-Ray와 대비하여 THz파를 T-Ray라고도 하며, X-Ray에 비해 백만분의 1에 해당하는 에너지를 가지고 있어서 인체에는 무해한 특성을 갖는다.

Directed NLOS(Non Line Of Sight): LOS는 무선통신에서 송신기와 수신기 사이의 전파경로에 장애물이 없고 송신 안테나와 수신 안테나가 안테나의 빔폭 내에서 서로 정면으로 일직선상에 놓여 있는 상태를 말하며, NLOS는 LOS 조건이 만족되지 않은 상태이다. 실내 무선랜과 같은 환경에서 THz 대역의 전파를 이용한 송신기와 수신기는 직진성이 아주 강해서 LOS 환경에서만 무선통신이 이루어지는데 송신기와 수신기 사이에 장애물이 있는 경우(NLOS) 이 장애물을 피해서 THz 반사경(mirror) 등을 이용하여 실내의 벽면에 THz파를 우회 반사시키는 개념을 말한다.

ASK	Amplitude Shift Keying
BER	Bit Error Rate
FCC	Federal Communication Commission
HBT	Hetero-junction Bipolar Transistor
HDTV	High Definition TV
HEMT	High Electron Mobility Transistor
hPa	Hecto Pascal
ISI	Inter-symbol Interference
ITU-R	International Telecommunication Union-Recommendation
LAN	Local Area Network
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LOS	Light Of Sight
MHEMT	Metamorphic HEMT
MMIC	Monolithic Microwave IC
NLOS	Non Line Of Sight
O/E	Optical to Electrical
PA	Power Amplifier
PAE	Power-Added Efficiency
PAN	Personal Area Network
PDP	Power Delay Profile
RMS	Root Mean Square

SAN Storage Area Network
 UWB Ultra Wide Band

참 고 문 헌

- [1] Peter H. Siegel, "Terahertz Technology," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.50, No.3, Mar. 2002, pp.910-928.
- [2] S. Cherry, "Edholm's Law of Bandwidth," *IEEE Spectrum*, Vol.41, No.7, July 2004, p.50.
- [3] <http://www.engadget.com/2008/01/14/33-megapixel-super-hi-vision-ultra-hdtv-could-be-on-the-air-in/>
- [4] Thomas Kurner, "THz Communication," IEEE 802.15-08-0336-00-0thz, 2008. 5.
- [5] Recommendation ITU-R P.676-7, "Attenuation by Atmospheric Gases," 2007.
- [6] Recommendation ITU-R P.838-3, "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods," 2005.
- [7] Peter F. Driessen, "Gigabit/s Indoor Wireless Systems with Directional Antenna," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol.44, No.8, Aug. 1996, pp.1034-1043.
- [8] Radoslaw Piesiewicz et al., "Short-Range Ultra-Broadband Terahertz Concepts and Perspective," *IEEE Antennas and Propag. Magazine*, Vol.49, No.6, Dec. 2007, pp.24-39.
- [9] T. Kleine-Ostmann et al., "Audio Signal Transmission over THz Communication Channel Using Semiconductor Modulator," *Electronics Letters*, Vol.40, No.2, 22 Jan. 2004.
- [10] www.tcl.tu-bs.de
- [11] C. Jastrow et al., "300 GHz Transmission System," *Electronics Letters*, Vol.44, No.3, 31 Jan. 2008.
- [12] Akihiko Hirata et al., "120-GHz Wireless Link Using Photonic Techniques," *Journal of Light-wave Technol.*, Vol.21, No.10, Oct. 2003, pp.2145-2153.
- [13] Akihiko Hirata et al., "High-Directivity Photonic Emitter Using Photodiode Module Integrated with HEMT Amplifier for 10-Gbit/s Wireless Link," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.52, No.8, Aug. 2004, pp.1843-1850.
- [14] Akihiko Hirata et al., "120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.54, No.5, May 2006, pp.1937-1944.
- [15] Trevor Bird, CSIRO ICT Center, Marsfield, NSW Australia, "Terahertz Developments in Australia," *Presented at IEEE Antennas and Propag. Symp.*, Albuquerque NM 9-13 July 2006.
- [16] <http://ieee802.org/15/pub/IGthz.html>
- [17] Leo Razoumov et al., "Feasibility of Gigabit-per-second Data Rates at THz Frequencies," IEEE 802-15-08-0133-00-0thz, 2008. 3.
- [18] Radoslaw Piesiewicz et al., "Ray-Tracing Simulations to Determine Indoor Channel Characteristics in THz Pico Cells Coated with Dielectric Mirrors," *Joint 29th Int'l Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int'l Conf. on Terahertz Electronics*, 2004, pp.539-540.
- [19] Radoslaw Piesiewicz et al., "THz Channel Characterization for Future Wireless Gigabit Indoor Communication Systems," *Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics IV, Proc. of SPIE*, Vol.5727, pp.166-176.
- [20] Radoslaw Piesiewicz et al., "Scattering Analysis for the Modeling of THz Communication Systems," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, Vol.55, No.11, Nov. 2007, pp.3002-3009.
- [21] Christian Jansen et al., "The Impact of Reflections from Stratified Building Materials on the Wave Propagation in Future Indoor Terahertz Communication Systems," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, Vol.56, No.5, May 2008, pp.1413-1419.
- [22] Radoslaw Piesiewicz et al., "Performance Analysis of Future Multigigabit Wireless Communication Systems at THz Frequencies with Highly Directive Antennas in Realistic Indoor Environments," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.14, No.2, Mar./Apr. 2008, pp.421-430.
- [23] Thomas Kurner et al., "An Integrated Simula-

- tion Environment for the Investigation of Future THz Communication Systems: Extended Version,” *Simulation*, Vol.84, No.2/3, pp.123-130.
- [24] N. Krumbholz et al., “Omnidirectional Terahertz Mirrors: A Key Element for Future Terahertz Communication Systems,” *Applied Physics Letters* 88, 202905, 2006.
- [25] Ibraheem A. Ibraheem et al., “Low-Dispersive Dielectric Mirrors for Future Wireless Terahertz Communication Systems” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol.18, No.1, Jan. 2008, pp.67-69.
- [26] A. Tessmann et al., “Metamorphic MMICs for Operation Beyond 200 GHz,” *EuMA Proc. of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conf.*, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2008, pp.210-213.
- [27] Arnulf Leuther et al., “50 nm MHEMT Technology for G- and H-Band MMICs,” *2007 Int’l Conf. on Indium Phosphide and Related Materials Conf. Proc. TuA 2-4 19th IPRM 14-18*, Matsue, Japan, May 2007, pp.24-27.
- [28] Michael Shur, “Terahertz Electronics,” *CS MANTECH Conf.*, Apr. 14-17, 2008, USA.
- [29] R.M. Enrick and J.L. Volakis, “Antenna Requirements for Short Range High Speed Wireless Systems Operating at Millimeter-Wave Frequencies,” *Microwave Symp. Digest, IEEE MTT-S Int’l*, 2006, pp.974-977.
- [30] www.virginiadiodes.com
- [31] Michael Schlechtweg et al., “From 100 GHz to Terahertz Electronics - Activities in Europe,” *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp.*, CSIC2006, Nov. 2006, pp.8-11.
- [32] W. Deal et al., “Demonstration of a SMMIC LNA with 16-dB Gain at 340-GHz,” *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp.*, Oct. 2007, pp.1-4.
- [33] A. Tessmann et al., “Metamorphic H-Band Low-Noise Amplifier MMICs,” *IEEE MTT-S, Int’l Microwave Symp. Digest 2007*, June 2007, pp.353-356.
- [34] Axel Tessmann et al., “Metamorphic HEMT MMICs and Modules for Use in a High-Bandwidth 210 GHz Radar,” *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, Vol.43, No.10, Oct. 2008, pp.2194-2205.
- [35] I. Kallfass et al., “A 210 GHz, Subharmonically-Pumped Active FET Mixer MMIC for Radar Imaging Applications,” *29th IEEE Compound Semiconductor IC(CSIC) Symp.*, Oct. 2007, pp.1-4.
- [36] Mehran Matloubian, “InP-based HEMTs for Millimeter Wave and Submillimeter Wave Power Application,” *SPIE*, Vol.2842, pp.22-32.
- [37] Jonathan Hacker et al., “250nm InP DHBT Monolithic Amplifiers with 4.8dB Gain at 324GHz,” *IEEE MTT-S 2008 Int’l Microwave Symp.*, June 2008, pp.1-4.
- [38] D. Porterfield et al., “A High-Pulsed-Power Frequency Doubler to 190GHz,” *IEEE 30th Int’l Conf. on Infrared and mm-Waves*, 19-23 Sep. 2005, pp.78-79.
- [39] David W. Porterfield, “A 200 GHz Broadband, Fixed-Tuned, Planar Doubler,” Virginia Millimeter Wave, Inc.