

미래 이동통신을 위한 밀리미터파와 테라헤르츠파 대역 회로 및 시스템 기술 동향

Millimeter and Terahertz Wave Circuit and System Technologies and Trends for Future Mobile Communications

장승현 (S. Jang, damduk@etri.re.kr)	기가통신미래기술연구그룹 책임연구원
공선우 (S. Kong, swkong@etri.re.kr)	기가통신미래기술연구그룹 선임연구원
이희동 (H.D. Lee, leehd@etri.re.kr)	기가통신미래기술연구그룹 책임연구원
박지훈 (J. Park, parkj@etri.re.kr)	기가통신미래기술연구그룹 연구원
김광선 (K.S. Kim, gskim@etri.re.kr)	기가통신미래기술연구그룹 책임연구원/PL
이광천 (K.C. Lee, kcleee@etri.re.kr)	기가통신미래기술연구그룹 책임연구원/그룹장

- I. 머리말
- II. 밀리미터파 대역 기술
- III. 테라헤르츠파 대역 기술
- IV. 맺음말

One of the most remarkable aspects of the recently completed 3GPP release-15 (5G new radio phase 1) is the fact that some millimeter-wave bands have been officially approved for 5G mobile communications. Because the demand for higher transmission capacity has only grown, other millimeter-wave or even higher-frequency terahertz-wave bands have attracted more attention over time. Based on this effort, this paper reviews and discusses the existing technologies and their trends in high-frequency circuits and systems at the millimeter and terahertz-wave bands, particularly for future mobile communications.

* DOI: 10.22648/ETRI.2018.J.330501

* 본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임[2017-0-00409, 5G 이동통신용 밀리미터파(40GHz 이하) 빔포밍 부품 개발].



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

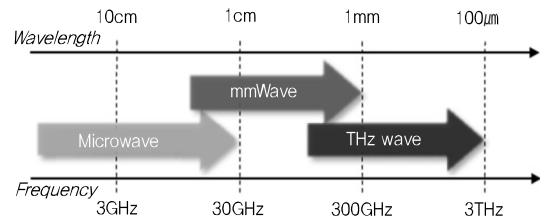
I. 머리말

1901년 마르코니에 의해서 영국 내 폴듀에서 약 3,600km 떨어진 캐나다의 세인트존스까지 무선을 통한 문자 전송 실험이 성공한 이후, 무선통신은 현재까지도 꾸준히 발전을 거듭해 오고 있다[1]. 1990년대 인터넷의 대중화 이후, 음성이 중심이던 무선 통신 데이터는 점점 데이터 중심으로 바뀌어 가기 시작하였으며, 최근 유튜브 등의 동영상에 기반한 웹서비스는 이러한 변화를 가속화 시키고 있을 뿐만 아니라 점점 더 많은 전송 용량을 요구하고 있다. 또한, 자율주행자동차를 비롯한 AR/VR, 홀로그램, 몰입형 통신, 사물인터넷 및 빅데이터 기반 서비스를 제공하기 위하여 무선 통신은 초광대역, 고신뢰/초저지연 및 대량 연결 등의 특징을 필수적으로 가지고 있어야 한다.

상기 기술한 특징을 갖는 이동통신 시스템 표준 규격을 제공하기 위하여 국제통신연합(ITU: International Telecommunication Union)에서는 5세대(5G) 이동통신을 위한 권고안으로 IMT-2020을 승인하였으며, 이후, 관련 표준화 활동이 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 사실상 가장 유력한 표준화 단체인 3GPP에서는 최근 주요 요구사항을 만족하는 5G 시스템의 표준 규격 Phase 1으로 Release 15를 완료하여 5G 상용화 시대가 성큼 다가왔음을 느낄 수 있다[2].

상기 3GPP Release 15에서 가장 주목할 만한 내용 중 하나는 이전의 LTE 주파수 대역(<6GHz)과 달리 밀리미터파 대역을 이동통신용 주파수로 고려한다는 것으로서, 이는 IMT-2020의 최대 20Gbps 전송 속도를 가입자에게 제공하기 위하여 광대역 주파수 자원이 확보되어 있는 밀리미터파 대역을 상용 이동통신 시스템에 처음으로 적용한다는 큰 의미가 있다.

시간이 지남에 따라서 가입자 요구 전송 용량은 계속 증가만 하기 때문에, 현재 이동통신용으로 확정되지 않은 또 다른 밀리미터파 주파수 대역뿐만 아니라 더 많은



(그림 1) 밀리미터파 및 THz 파장/주파수 대역

대역폭을 확보하고 있는 테라헤르츠파(THz: Tera-hertz) 대역의 사용 가능성은 점점 더 높아질 것으로 예상되므로 관련 기술에 대한 동향 분석이 필요하다[그림 1) 참조].

이러한 노력의 일환으로, 본고에서는 미래 이동통신 시스템을 위한 밀리미터파 및 THz 대역의 주요 통신 기술 동향을 살펴보고자 한다. 이를 통하여, 어떤 기술이 해당 주파수 대역에서 주목받고 있으며 어떠한 이슈가 있는지를 파악하여, 연구 개발 초기에 도움이 될 해당 기술에 대한 주요 정보를 전달하고자 한다.

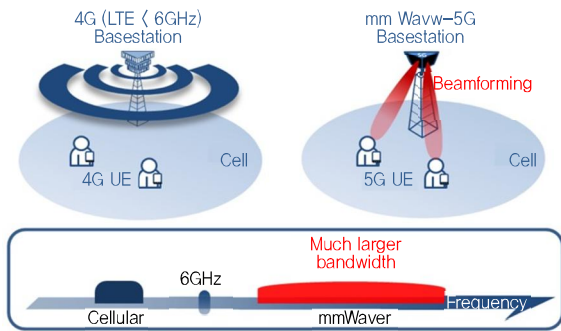
II. 밀리미터 파 대역 기술

1. 개요

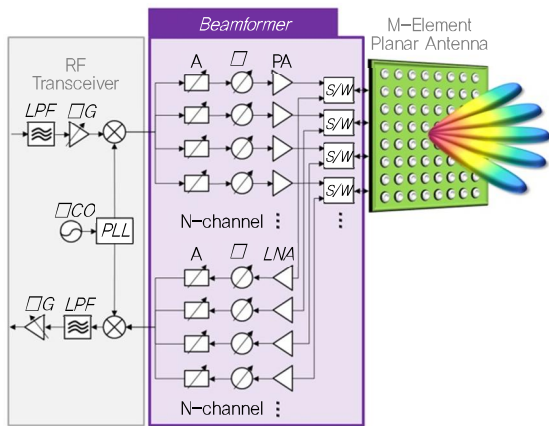
밀리미터파 주파수 대역은 고전적으로 30GHz에서 300GHz 대역으로 정의되지만, 최근에는 이동통신 시스템 반송파 주파수 용도로서는 보통 10~100GHz 대역을 의미한다. 최근 완료된 3GPP Release 15에서는 밀리미터파 대역 주파수 용도로 26.5~29.5GHz, 24.25~27.5GHz 및 37~40GHz를 정의하였다. 본 장에서는, 밀리미터파 대역을 이동통신용으로 사용 가능하게 해준 핵심 기술인 빔포밍(Beamforming)에 대해서 살펴보고 국내/외 개발 동향을 기술하고자 한다.

2. 주요 기술

(그림 2)의 좌측에 도시된 바와 같이, 4세대 이동통신(4G) 시스템에서는 기지국에서 가입자 단말로 신호를



(그림 2) 4G 및 밀리미터파 기반 5G 이동통신 시스템의 주요 전파 방식



(그림 3) 아날로그 빔포밍 구조

송신할 때 안테나를 통해서 넓은 범위로 전파가 방사되는 형상을 갖는다. 이는 셀 내 음영 지역을 없애고 넓은 셀 커버리지를 얻기 위한 간단하면서도 최적의 전파 방사 패턴이라 볼 수 있지만, 밀리미터 주파수 대역에서는 이러한 전파 방사 패턴을 사용하기가 어렵다. 왜냐하면, 밀리미터파 주파수는 기본적으로 높은 직진성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 무선 채널에서 높은 신호 경로 손실로 인하여 넓은 범위로 전파를 방사하기 위해서는 실제 적용하기 어려울 정도로 큰 송신 파워가 필요하기 때문이다. 하지만, 5G 이동통신의 주요 목표 중 하나인 최대 20Gbps급 전송 속도를 달성하기 위해서는 기존의 6GHz 이하 주파수 대역은 이미 포화 상태로서 넓은 대역폭을 확보하기가 현실적으로 불가능하기 때문에, 자

연스럽게 넓은 주파수 자원을 확보하고 있는 밀리미터파 주파수 대역이 관심을 받게 되었고, 이동통신용으로서의 밀리미터파 문제점을 극복하기 위한 솔루션으로서 빔포밍 기술이 각광받게 되었다.

빔포밍 방식은 디지털, 아날로그 및 하이브리드 방식이 있지만, 하드웨어 복잡도 및 전력 소모 등의 현실적인 문제로 인하여 국내외 업체 및 연구 기관에서는 주로 (그림 3)에 도시된 바와 같은 아날로그 빔포밍 방식 또는 디지털과 아날로그의 하이브리드 구조인 하이브리드 빔포밍 송수신기를 채용하고 있다. 따라서, 본고에서도 상기 빔포밍 방식 위주로 기술 동향을 소개하고자 한다.

3. 국내 개발 동향

가. 삼성(SAMSUNG)

삼성전자는 미국 최대 이동통신 사업자인 Verizon과 협업하여 2018년 미국의 7개 도시에서 5G 시험을 이미 실시하였으며, 올해 하반기에는 새크라멘토에서 5G 기술을 활용한 고정형 무선 액세스(FWA: Fixed Wireless Access) 상용화 서비스를 시작할 예정이다[3]. 아직까지는 스마트폰과 같은 이동 단말에 빔포밍 송수신기를 적용하기에는 현실적으로 크기 및 전력 소모 등의 이슈가 존재하기 때문에, 이동국(MS: Mobile Station)에서 상기 이슈가 없는 FWA로 먼저 상용화 서비스를 시작하는 방향으로 전략적 선택을 한 것으로 보인다.

삼성전자의 개발 내용은 많이 알려져 있지 않지만, 공개된 자료 중 고속 전송 테스트 베드 셋업이 참고문헌 [4]에 나와 있다.

테스트 베드의 기지국(BS)과 이동국(MS)은 28GHz 주파수 대역에서 800MHz의 신호 대역폭과 TDD(Time Division Duplex) 모드를 갖는 빔포밍 안테나를 사용하여 구성되었으며, 각 MS에서 2×2 MIMO(Multiple Input Multiple Output)를 지원함으로써 다운 링크에 있는 2개의 정지된 MS에 대해 총 7.5Gbps의 데이터 전

〈표 1〉 삼성전자 28 GHz 빔포밍 시제품의 주요 RF 파라미터

Parameters	BS	MS
Frequency	27.925GHz	
Bandwidth	800MHz	
Max. Tx power	37dBm	23dBm
Num. of RF path	16	4
ANT config.	8×6 Planar	4×1 Linear
Max. ANT gain	21dBi	7dBi
EIRP	58dBm	30dBm

송률(MS 당 3.77Gbps)을 달성했다. 이는 삼성전자가 올해 상용화를 앞둔 FWA와 같은 통신 환경과 비슷한 환경이라고 볼 수 있으므로, 대략적인 FWA 서비스 성능 추정을 해볼 수 있다. 해당 시제품의 주요 RF 파라미터를 〈표 1〉에 요약하였다. 해당 시제품의 BS의 경우, 총 48 안테나 소자(=8×6 Planar)에 대하여 16개의 RF 경로를 두는 빔포밍 구조를 취하고 있다[4].

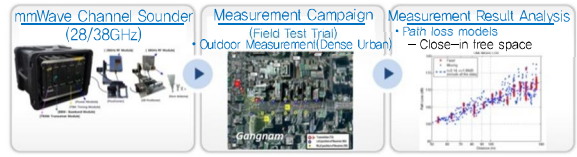
또한, 고속 이동 환경 및 다중 셀에서의 핸드-오버 성능 측정용 테스트 베드를 구축하여 측정을 진행하였으며, 단일 셀 환경에서는 고속 110km/h의 속도로 이동하는 MS에 대해 1.2Gbps의 데이터 전송률을 보여줬고, 세 개의 다중 셀 환경에서 IMT-Advanced 핸드 오버 중단 시간 요구 사항 인 27.5ms를 만족하는 평균 핸드 오버 지연 12ms와 평균 핸드 오버 중단 시간 21ms를 보여줬다[4].

나. 한국전자통신연구원

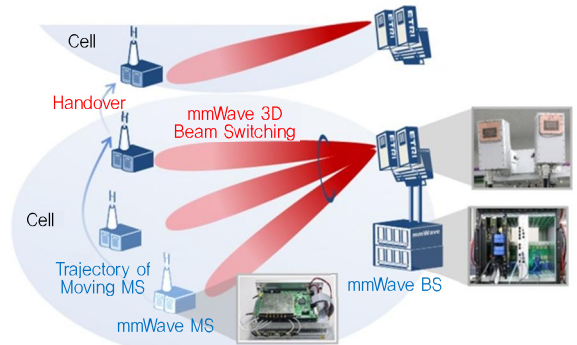
한국전자통신연구원은 기가코리아 사업을 필두로 관련 과제를 통하여 5G 이동통신용 밀리미터파 채널 모델링, 빔포밍 시스템 및 칩에 대한 다양한 연구 개발을 수행하고 있다.

1) 밀리미터파 대역 채널 모델링

(그림 4)에 도시된 바와 같이, 밀리미터파 대역(28/38GHz)의 채널 사운더 하드웨어를 개발하고, 이를 활용하여 실제 도심 지역 등에서 측정한 후 이동통신용



(그림 4) 한국전자통신연구원 28/38GHz 대역 채널 측정 및 모델링



(그림 5) 한국전자통신연구원의 28GHz 대역 이동통신 시스템

[출처] 이훈, “밀리미터파 기가급 이동통신기술,” 한국통신학회 동계 학술대회 특별초청강연, 2016.

〈표 2〉 한국전자통신연구원 28GHz 이동통신 시제품의 주요 파라미터

Parameters	BS	MS
Frequency	27.5~28.5GHz (1GHz BW)	
Beamforming	Beam switching	
Num. of beams	16/sector	4
ANT config.	6×5	4
Modulation	64QAM OFDMA	16QAM SC-FDMA
Peak data rate	20Gbps	1.5Gbps

[출처] 이훈, “밀리미터파 기가급 이동통신기술,” 한국통신학회 동계 학술대회 특별초청강연, 2016.

[출처] T.J. Kim, “A mmWave-Based Mobile Communication System(Giga KOREA-5G),” 5G Global Summit, Dec., 3rd, 2015.

밀리미터파 주파수 대역 채널 모델을 만드는 연구를 진행 중에 있다.

2) 28GHz 대역 5G 시스템 및 부품 개발

기가코리아 사업을 통하여 개발된 5G용 28GHz 대역 이동통신시스템 시제품과 주요 파라미터를 각각 (그림 5)와 〈표 2〉에 나타냈다. 기존의 다른 빔포밍 기술과의

차이점은 위상 배열 안테나 등을 사용한 빔포밍 방식이 아닌, 여러 개의 고정된 빔을 구비하고 통신 환경에 맞춰서 최적의 빔을 선택하여 통신을 하는 빔스위칭 구조를 사용한다는 것이다. 이러한 구조를 취함으로써, BS와 MS의 신호 변조기 구성을 단순화하여 시스템 구현이 용이하게 되어, 유지 보수 및 전력 소모 측면에서 장점을 가질 수 있다.

BS에서는 밀리미터파 주파수 대역의 높은 신호 손실을 보상하기 위해서 높은 빔 지향성을 갖도록 설계되었으며, 한 섹터당 16개의 빔을 구비하고 각 빔폭은 15° 정도로 설계되었다. MS의 경우, BS로부터 오는 신호를 잘 받기 위해서 안테나가 상대적으로 넓은 방사 패턴으로 설계되어 90°의 빔폭(Azimuth)을 가진 4개의 안테나로 구성되었다[5].

개발된 이동통신 시제품을 통하여 셀 내 이동 및 핸드오버 상황에서의 측정을 진행하였고, 정지 상태에서의 최대 전송 속도는 다운/업 링크가 각각 20/1.5Gbps 성능을 보였다[6].

상기 시스템 개발 경험을 바탕으로, 한국전자통신연구원은 다양한 공정을 사용한 밀리미터파 대역 통신 부품을 계속 연구 개발 중에 있다.

4. 국외 개발 동향

가. 퀄컴(Qualcomm)

퀄컴의 28GHz 대역 이동통신 시스템 시연 자료에 따르면, 기지국 장비(eNB)는 16개의 RF 채널이 총 128안테나 엘리먼트(element)를 사용하여 빔포밍 송수신을 수행하며, 단말 장비(UE: User Equipment)에서는 4개의 부배열(sub-array)와 각 부배열마다 4개의 RF채널로 구성이 되어 있다. 해당 시제품을 통해서, 셀간 핸드오버, 고속 주행 시 통신 및 실내 환경에서의 통신 등을 검증하였다[7].

시스템 개발과 함께 단말 등을 위한 빔포밍 부품 개발

도 진행 중이며, 최근 공개된 CMOS 기반의 빔포밍 칩과 단말 시제품이 참고문헌 [8]에 나와있다. 시제품에는 4×2 엘리먼트로 구성된 안테나 모듈 4개를 구비하여 다양한 방향으로 수신되는 신호를 수신할 수 있도록 하였다. 또한, 각 안테나 모듈 바로 아래에 설계한 빔포밍 칩을 위치시켜서 신호 삽입 손실을 최소화하였다. 개발된 칩은 6.5GHz 중간주파수(IF: Intermediate Frequency)신호를 받아서 28GHz 대역의 총 24개의 RF 채널을 지원하며, 대역폭은 송신/수신 모드에서 각각 7.5/5.5GHz이고, 송신기 효율은 약 7.5%로서 4채널 기준 약 0.36W의 전력을 소모한다.

나. Anokiwave

Anokiwave는 미국 San Diego에 기반을 둔 밀리미터파 대역 집적회로 설계 전문 회사로서, 최근 5G 이동통신용 28GHz 및 39GHz 대역 4채널 아날로그 빔포밍 칩을 상용화하면서 많은 관심을 받고 있다[9]. 28GHz 대역 AWMF-0157칩의 경우, 송신 모드에서 25dB 이득 및 +14dBm 최대 출력 파워 성능을 보이며, 수신 모드에서는 잡음 지수 5.5dB 및 -21dBm IIP3 수준의 성능을 갖는다[10].

다. IBM

참고문헌 [11] 및 [12]에 최근 IBM의 28GHz 대역 빔포밍 칩 및 안테나를 포함하는 패키지 형상이 나와있다. 개발된 칩은 V/H 이중 편파를 지원하기 위하여 각 편파마다 16개의 RF 채널(총 32채널/칩)을 구비하고 있다. IF 주파수로 3GHz를 사용하였으며, 칩 내부에서 28GHz 대역으로 주파수 업/다운-컨버팅을 한 후에 16개 RF 채널로 빔포밍 송수신 동작을 한다. 하나의 RF 채널은 +14dBm 출력 P1dB, 32dB 송신 이득 및 6.0dB의 수신 잡음 지수 성능을 보였으며, 상기 32채널을 지원하는 칩의 크기는 15.6×10.6mm²로서 SiGe BiCMOS 130nm 공정을 사용하여 제작되었다.

상기 빔포밍 칩 4개를 64개의 이중편파 안테나와 함께 집적한 패키지도 제작하였으며, 해당 패키지 칩은 빔 제어 범위가 $\pm 50^\circ$, 최소 빔 제어 분해능은 1.4° 이고 전력 소모는 약 4.6W였다[12].

라. UCSD(Univ. of California at San Diego)

학교 중 가장 활발한 연구 활동 중인 UCSD는 개발한 28GHz 대역의 2×2 빔포밍 칩 8개를 사용하여 4×8 배열 안테나를 구성하였다. 제작된 배열 안테나는 출력 P1dB에서 EIRP 41dBm 이고, 빔 스캔 범위가 E와 H 평면에서 각각 $\pm 20^\circ$ 와 $\pm 50^\circ$ 였으며, 전력 소모는 송신/수신 모드에서 각각 6.4/4.2W였다. 이 배열 안테나를 사용한 300m 링크 전송 테스트에서 전체 스캔 범위에서 1.0~1.6Gbps 전송 속도를 보였다[13].

마. 중국 Huawei

Huawei는 5G 이동통신용으로 밀리미터파보다는 3.5GHz 주파수 대역에 더 집중하고 있지만, 28GHz 대역 빔포밍 시스템 개발도 동시에 진행 중에 있다.

최근 일본의 NTT 도코모와 340m 높이에 있는 도쿄 skytree 전망대에 28GHz 대역 5G 이동통신 기지국을 설치하고, 약 1.2km가량 떨어진 곳에 단말을 두고 전송 시험을 진행하였으며, 하향/상향 속도가 4.52Gbps와 1.55Gbps를 보였다[14].

참고문헌 [15]에 따르면, 중국 상하이 지역에서 거리에 따른 이동통신 전송 속도 측정 시험이 진행되었으며, 기지국은 C-band(200MHz 대역폭, 64채널)와 28GHz 대역(1GHz 대역폭, 32채널)을 사용하고 단말은 송신 4채널 및 수신 8채널로 구성되었다. 측정 결과를 보면, 가까운 거리에서는 28GHz 대역 전송 속도가 약 15Gbps까지 나오며 거리가 멀어질수록 낮아지다가 약 500m 근처까지 가면 약 2Gbps 정도의 성능을 보이며, C-band와 밀리미터파 대역을 포함하는 총 전송 속도는 근접 거리에서 최대 18Gbps까지 측정되었다[15].

III. 테라헤르츠파 대역 기술

1. 개요

5G 이동통신 시스템에서 지원하는 전송 속도 보다 더 높은 속도(예를 들면, 수십 Gbps 또는 100Gbps)를 제공하기 위해서는 밀리미터파 대역보다 더 넓은 대역폭(수십 GHz)을 확보하고 있는 THz 대역(0.1~3THz)으로 방송과 주파수를 높여야 한다.

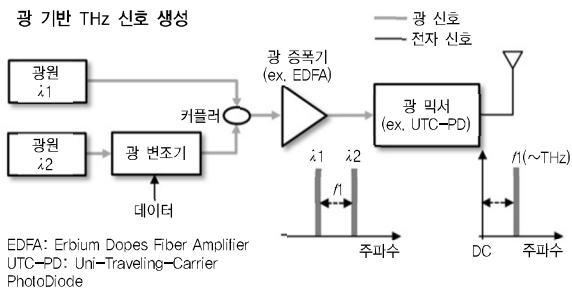
하지만, THz 대역은 대기 중 높은 전파 경로 손실 및 수증기로 인한 흡수로 인하여 전송 거리가 급격하게 제한되므로, 적용 분야 및 범위에 따라서 적절한 주파수 대역 선정이 필요하다. 그럼에도 불구하고 최근 자료에 따르면, 굉장히 높은 이득을 갖는 안테나 사용을 가정할 경우, 10km 이내의 옥외 장거리용으로 150GHz 이하 대역, 1km 이내의 중거리용으로 350GHz 이하 대역, 100m 이내의 실내 단거리용으로 500GHz 이하 대역을 통신용으로 사용 가능할 것으로 보고 있다[16].

본고의 THz 대역 기술의 작성 구조를 앞에서 살펴본 밀리미터파의 대역 기술과는 조금 다르게 작성하고자 한다. 이동통신을 위한 밀리미터파 기술의 경우, 이미 기술이 어느 정도 성숙되어 대부분의 연구 개발 참여자들이 비슷한 신호 송수신 구조(예를 들면, 위상 배열 기반 송수신기)를 사용하고 있기 때문에 각 연구 기관 및 기업의 개발 상황 위주로 설명을 하면 되었지만, THz 대역 통신은 주파수 대역, 신호발생기의 구조, 빔형성 및 빔 스티어링 방법 등등 아직도 활발하게 연구 중에 있으므로 각각의 요소 기술을 먼저 소개하고, 이후에 링크 레벨에서의 개발 결과를 기술하고자 한다.

2. THz 신호 발생기

가. 광 기반 THz 신호 발생기

전자 회로 대비 넓은 주파수 특성으로 인하여 THz 신호 발생기는 초기에 주로 광학 기반 기술로 만들어졌으며, 현재도 높은 THz 주파수 대역에서는 여전히 광 기반 신호



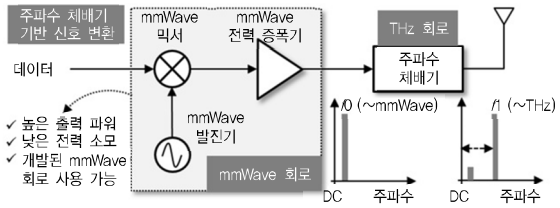
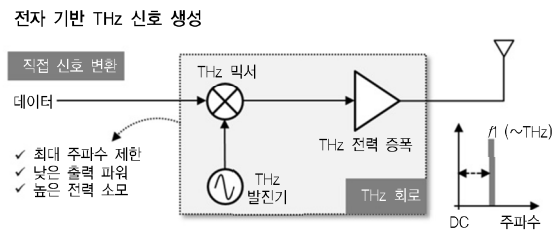
(그림 6) 광 기반 THz 신호 생성

발생기를 사용하고 있다. (그림 6)에 도시한 광 기반 THz 신호 생성기를 살펴보면, 서로 다른 파장을 갖는 2개의 광 신호를 광전변환기에 인가하면 광 믹싱(mixing) 효과로 인하여 상기 두 광 신호 주파수 차이에 해당하는 주파수에 전자 신호가 출력된다. 광 신호의 주파수가 수백 THz 정도로 높기 때문에, 광전변환기의 대역폭이 지원하는 주파수까지 THz 대역 신호를 생성할 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 효과를 극대화하고자 광전변환기로 기존의 PIN photodiode 보다 넓은 대역폭과 높은 출력 전류를 제공하는 UTC-PD(Uni-Traveling-Carrier PhotoDiode)가 개발되어 사용되고 있다[17], [18].

나. 전자 기반 THz 신호 발생기

1) 직접 신호 변환

전자 회로를 사용한 THz 신호 발생기의 가장 단순한 구조를 (그림 7)의 상단에 나타냈다. THz 대역 발진기, 믹서 및 전력증폭기를 사용하여 일반적인 RF 송신기처럼 구현하는 것이다. 하지만, THz 주파수 대역이 현재 반도체 공정의 f_t 및 f_{max} 와 차이가 없기 때문에 이 구조를 사용해서 얻을 수 있는 최대 주파수가 높지 않다는 단점을 갖는다. 뿐만 아니라, 상기 반도체의 주파수 대역 한계로 인하여, 필연적으로 출력 파워 및 이득이 낮게 되고 이로 인하여 전력을 많이 소모하게 된다. 따라서, 반도체 공정의 한계 주파수가 아주 높아지지 않는 이상 다른 구조가 필요하다.



(그림 7) 전자 기반 THz 신호 생성

2) 주파수 체배기 기반 신호 변환

상기와 같은 문제점을 극복할 수 있는 구조로서, (그림 7)의 하단에 나와 있는 주파수 체배기 기반의 THz 신호 송신기가 가장 유력하다[19], [20]. THz 주파수 대역보다 낮은 밀리미터파 대역에서 상대적으로 큰 이득과 높은 출력 전력으로 신호를 충분히 증폭한 이후에 주파수 체배기를 통하여 원하는 주파수 대역의 신호를 안테나를 통해서 송신하는 구조(AMC: Amplifier and Multiplier Chain)로서, 밀리미터파 대역 회로는 지금의 반도체 공정으로 충분한 성능을 얻을 수 있기 때문에 직접 신호 변환 구조에 비해서 많은 이점을 얻을 수 있다. VDI 사에서 나온 상용 제품으로 최대 출력 주파수가 1.1THz까지 동작하는 송신 모듈을 판매하고 있으며 [19], 빔 형성과 제어를 위한 위상 배열 회로(4×4 배열, 입력: 94GHz, 출력: 0.28THz)에도 적용되고 있다[20].

또한, AMC 구조를 사용하였을 경우, 밀리미터파 대역으로 이미 개발된 28GHz 또는 60GHz 대역 등의 송수신 회로를 재사용할 수 있는 가능성도 있기 때문에 회로 설계, 제작 및 검증에 시간을 단축할 수 있다는 부가적인 이점도 갖는다.

하지만, 반도체 공정의 발달로 인하여, f_t 및 f_{max} 가 직접신호 변환 구조를 적용하기에 충분하게 높아진다면

성능 측면에서는 직접 신호 변환 구조가 최적이라 할 수 있으므로, 구현하고자 하는 THz 주파수 대역과 반도체 공정의 최대 주파수 성능을 감안하여 회로 구조를 선정해야 할 것이다.

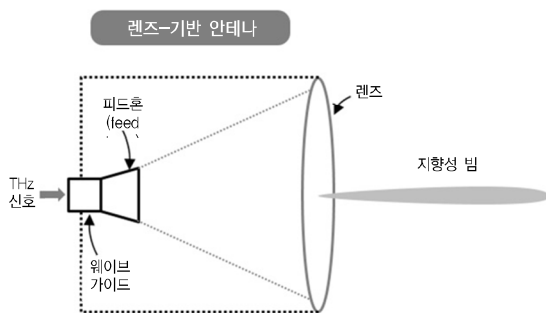
3. THz 빔형성

THz 주파수 대역의 대기 중 경로 손실은 기존의 이동통신 시스템에서 사용하던 주파수 대역의 경로 손실보다 훨씬 클 뿐만 아니라, 높은 주파수로 인하여 송신기의 최대 출력 파워가 낮고, 수신기의 잡음 지수도 높아지게 된다. 따라서, 이동통신 용도로서 수km 정도의 중/장거리 전송을 하기 위해서는 송신과 수신 모두에서 안테나의 이득이 아주 높아야 한다. 관련하여, 본 장에서는 THz 대역의 높은 지향성 빔을 만들기 위한 빔형성 방법 들을 살펴보고자 한다.

가. 렌즈-기반 안테나

전파가 유전 물질을 통과할 때, 이동 거리에 따라서 서로 다른 위상 지연을 겪게 되는 원리를 안테나에 이용한 것이 (그림 8)에 도시된 렌즈-기반 안테나이다. 렌즈의 원하는 위치로 전파 신호를 인가하기 위하여 웨이브 가이드와 피드혼을 사용할 수 있다.

참고문헌 [21]에 120GHz 대역의 렌즈-기반 안테나인 가우시안 광학 렌즈 안테나(GOA: Gaussian Optical Lens Antenna) 2종이 나와있다. 이 중, 지름 75mm의



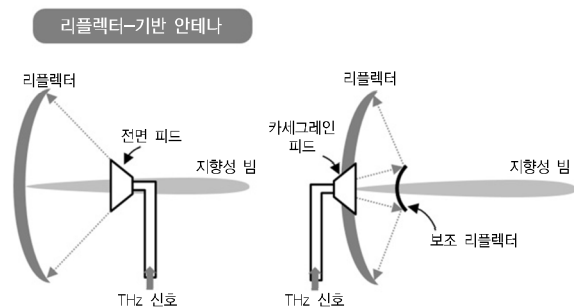
(그림 8) 렌즈-기반 안테나 구조

GOA는 이득 37.1dB 및 빔폭 2.3°의 성능을 보였으며, 375mm의 더 큰 지름을 갖는 GOA는 이득 52.3dB 및 빔폭 0.47°의 성능을 나타냈다.

렌즈 안테나는 높은 안테나 이득을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 높은 이득을 얻기 위해서 안테나의 크기가 커지게 되고, 렌즈 무게로 인하여 무겁다는 단점을 갖는다. 반송파 주파수가 높아질수록 렌즈-기반 안테나의 크기나 무게는 줄어들어야 하지만, 대기 중의 경로 손실도 같이 커지게 되므로 더 높은 안테나 이득을 얻기 위해서는 더 큰 안테나 어퍼처(aperture) 크기가 필요하게 되어 안테나의 크기를 크게 줄이기는 쉽지 않을 것으로 예상된다.

나. 리플렉터-기반 안테나

(그림 9)의 좌측에 도시된 바와 같이, 리플렉터 안테나는 기본적으로 리플렉터(반사면)와 피드 안테나로 구성되고, 피드 안테나에서 들어오는 전파는 리플렉터에서 반사된 후 안테나의 초점으로 모이도록 설계된다. 매우 높은 안테나 이득을 얻을 수 있는 구조로서, 초장거리 통신을 해야 하는 위성 통신용으로 많이 사용되어 왔다. NTT에서는 120GHz 대역 통신을 위한 고지향성 안테나로서 카세그레인 안테나도 제작하였으며, 제작된 안테나의 지름은 450mm이고 이득은 48.7dBi였다[22]. 참고문헌 [21]의 가우시안 광학 안테나와 비교하면, 상기 카세그레인 안테나는 크기가 좀 더 커지고 이득은 조



(그림 9) 리플렉터-기반 안테나 구조

금 낮지만, 렌즈 안테나에 비해서 무게가 가볍고, 주 리플렉터를 제어하지 않더라도 보조 리플렉터를 제어하여 안테나의 지향성 빔을 스티어링할 수 있다는 이점이 있다[23]. 하지만, 휴대용 이동 단말에 적용하기에는 렌즈 안테나와 같이 작지 않은 크기라 할 수 있고, 빔 스티어링 범위가 넓지 않기 때문에 기계적인 빔 제어가 여전히 필요하다.

다. 위상 배열 안테나

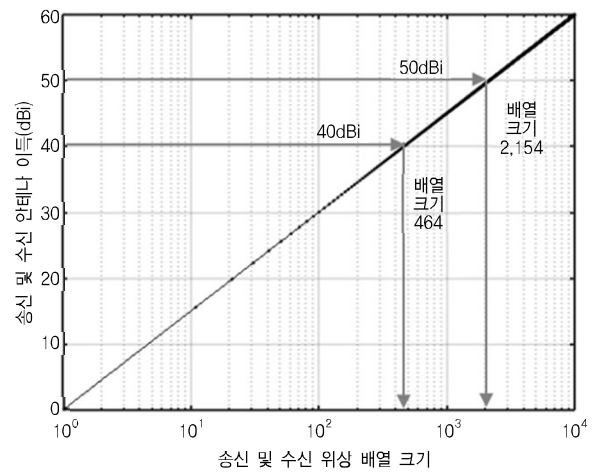
위상 배열 안테나 구조를 (그림 10)에 나타냈다. 송신하고자 하는 여러 개의 경로로 분기를 하고, 각 경로에 서로 다른 위상을 겪게 함으로써 지향성을 갖는 안테나 출력 패턴을 얻을 수 있다. 송신의 경우, 배열 수 증가에 따라서 배열 이득이 커지는 효과와 함께 신호 출력 파워가 증가하게 되어 송신 EIRP가 배열 수 N 의 제곱(N^2)에 비례하여 증가하게 되고, 수신인 경우, 오직 배열 이득만 존재하게 되어 배열 수 N 에 비례하여 수신 감도가 좋아지게 된다.

앞에서 살펴봤던 고지향성 안테나와 비교하기 위하여, (그림 11)에 위상 배열이 송신과 수신기에 같은 크기로 설계하였을 때, 안테나 이득(송신 및 수신에 같은 이득을 갖는 테나 사용한다고 가정)이 어느 정도인지에 대한 이론적인 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 시뮬레이션 결과를 보면, 송신 및 수신 안테나로 50dBi의 지향성 이득을 갖는 안테나와 비슷한 성능을 위상 배열 안테나로 얻고자 한다면 약 2,154개의 엘리먼트를 갖는 위상 배열 안테나를 송신과 수신기에 각각 사용해야 함을 알 수 있다.

위상 배열 안테나는 앞에서 살펴보았던 렌즈 및 리플렉터 기반 안테나에 비해서 전자 신호로 동적 빔 제어가 가능하기 때문에 기계적인 빔 제어가 필요하지 않으며, THz 대역의 위상 배열 안테나를 칩 안에 구현을 한다면 상대적으로 굉장히 작은 크기의 안테나를 만들 수 있다는 이점을 갖는다. 참고 문헌 [20]의 0.28THz용 4×4



(그림 10) 위상 배열 안테나 구조

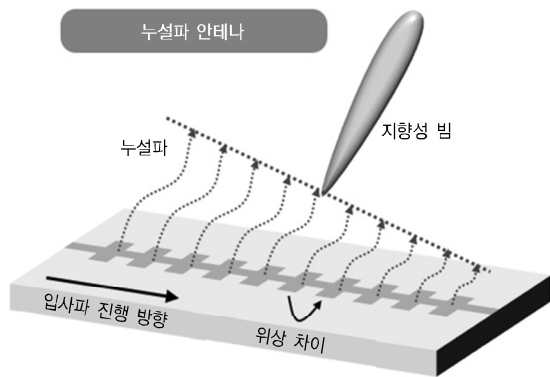


(그림 11) 위상 배열 크기에 따른 등가 송/수신 안테나 이득
위상 배열 안테나를 2,154개의 엘리먼트로 그대로 확장한다고 가정한다면 약 3.2cm×3.2cm 정도의 크기가 될 것으로 예상된다.

하지만, 많은 수의 신호 경로로 인하여 전력 소모가 매우 클 뿐만 아니라, THz 대역 증폭기의 효율이 낮기 때문에 회로에서 발생하는 열 문제로 인하여 하나의 칩으로 집적하기가 쉽지 않을 것으로 추정된다.

라. 누설파 안테나

1차원 누설파 안테나(Leak-wave antenna) 구조를 (그림 12)에 나타냈다. 입사파가 안테나를 진행하면서 전파 누설이 발생하는 구조로서, 안테나의 진행 경로상에 의도적인 위상 차이가 존재하게 설계되어 누설파의



(그림 12) 누설파 안테나

공간 합이 일종의 위상 배열 안테나와 비슷한 지향성 전파 특성을 갖도록 하는 안테나이다.

위상 배열 안테나와 비슷하게 상대적으로 작은 크기로 안테나를 만들 수 있고, 누설파 안테나 경로상에 배랙터(varactor) 등을 위치시키면 전자 신호로 빔 제어가 가능하다는 이점을 갖는다. 하지만, 위상 배열 안테나와 다르게 복수 개의 출력 신호가 존재하는 것이 아니라 하나의 피드 네트워크를 통해서 안테나로 신호가 인입 되기 때문에 위상 배열 안테나와 같은 높은 공간 파워 결합 성능을 얻기가 힘들고, 빔 제어를 위한 배랙터와 같은 소자를 안테나 내에 사용할 경우 송신 신호의 추가적인 손실이 발생하므로 효율이 나빠지는 단점을 갖는다.

4. 링크 레벨 주요 개발 동향

일본의 NTT는 2000년부터 120GHz 주파수 대역을 사용하는 통신 시스템 개발을 꾸준히 해오고 있으며, 초기에는 UTC-PD를 이용한 광 기반 THz 송신기 위주로 개발을 해오다가, 2004년부터는 InP HEMT 공정을 이용한 MMIC 기반 연구 및 개발하고 있다[22]. 특히, 5.8km에 달하는 장거리에서 ASK 변조 방식 (FEC 사용)을 사용한 11.1Gbps 통신을 성공함으로써, THz 대역 통신이 근거리뿐만 아니라 중/장거리 통신에도 사용 가능함을 보였다[24]. 하지만, 낮은 송신 출력 파워, 넓은 잡음 대역폭 및 높은 대기 중 전파 손실 등으로 인하여,

송신과 수신기에 이득이 각각 52dBi 및 49dBi로 매우 높은 카세그레인 안테나를 사용해야 했다. 이로 인하여, 빔폭이 0.5°보다 좁게 되어 빔 트래킹이 쉽지 않은 단점을 가지고 있다.

중국의 Terahertz research center에서는 340GHz 대역에서의 송수신 시제품을 개발하여 통신에 성공하였으며, 변조 방식은 16QAM, 전송 속도는 3Gbps 및 전송 거리는 50m 정도였다[25]. NTT와 마찬가지로 높은 안테나 이득을 위하여 48.4dBi 이득을 갖는 카세그레인 안테나를 사용하였으나, 송신 출력 P1dB 파워가 -17.5dBm으로 매우 낮아서, 높은 안테나 이득에도 불구하고 EIRP가 30.9dBm 수준으로 중/장거리 전송은 어려웠다. 이는 사용 가능한 340GHz 대역 증폭기의 부재로 추정되며, THz 대역의 통신 시스템의 성능을 최대한 달성하기 위해서는 송수신 시스템뿐만 아니라 MMIC 증폭기 회로 개발 및 가능한 많은 회로 블록이 집적된 MMIC 칩 개발도 함께 수행되어야 하는 필요성을 보여준다.

이외에도, 240GHz 대역을 사용하여 850m 거리에서 QPSK 변조 방식으로 64Gbps 전송 속도를 달성한 결과[26] 및 파장-분할 다중 방식의 광원 6개와 UTC-PD를 사용하여 0.3~0.5THz 대역에서 총 전송 용량 260Gbps를 달성한 결과[27]도 주목할 만하다.

IV. 맺음말

본고에서는 미래 이동통신을 위한 밀리미터파 및 THz 대역의 고주파 회로 및 시스템 개발 동향을 살펴보았다.

5G 이동통신용 밀리미터파 기술은 빔포밍 회로 및 시스템 위주로 기업 및 연구 기관들이 개발을 진행해오고 있으며, 올해 하반기 내로 삼성전자의 28GHz 대역 통신 장비를 사용하여 미국 내 도시에서 FWA 서비스 형태로 상용화가 될 예정이다. 이동 단말에 적용할 수 있는 밀리미터파 빔포밍 칩도 퀄컴 등의 여러 기업에서 개

발 중에 있고, 전력 소모 및 지향성 빔의 수신 감도 등의 이슈가 아직 남아 있지만 멀지 않은 시점에 기술 성숙도가 크게 증가할 것으로 예상된다.

반면에, 이동통신을 위한 THz 대역 통신은 아직 연구 초기 단계라 할 수 있으며, 효율적인 THz 신호 생성 및 빔 형성 구조/회로 등에 대한 연구가 현시점에서 절실하다. 기존의 THz 통신에서는 중/장거리 전송 또는 높은 전송 속도를 위하여, 송신/수신기에서 약 50dBi 이득을 갖는 안테나를 사용하였는데, 이로 인한 매우 좁은 빔폭(1° 이하)으로 빔 추적이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 상대적으로 빔 추적이 쉬운 점대점 통신 형태의 무선 백홀에 적용해볼 수 있을 것으로 예상되지만, 이동 단말에 THz 대역 통신을 적용하기 위해서는 많은 후속 연구가 진행되어야 할 것이다. 이를 위하여, 송신기의 출력 파워 향상 및 수신기의 잡음 지수를 낮추는 방향으로 연구해 볼 수 있으며, 특히, 송신 파워의 경우, 기존의 고주파수 대역에서 사용되었던 InP 공정뿐만 아니라, 고출력 파워에 강점을 갖는 GaN 공정을 적용을 고려해볼 만하다. 이와 함께, 송수신 회로 내 THz 신호 손실을 줄이기 위하여 회로 집적도를 높이는 노력도 필요하며, 세계 유수의 기술 선도 연구기관에서 이미 시작한 THz 빔포밍 회로 개발 경쟁에도 빨리 참여해야 할 것이다.

마지막으로, 5G 이동통신 시스템에 밀리미터파 주파수 대역을 사용하겠다는 의견이 처음 나왔을 때, 대부분의 관련 전문가들은 굉장히 부정적이었다. 하지만, 얼마 전 완료된 3GPP Release 15에서 보듯이 결국 밀리미터 주파수를 5G 이동통신 시스템에 사용하는 것은 이제 현실이 되었다. 기술은 지금까지 봉착한 어려운 문제를 하나씩 풀어내면서 결국 조금씩 앞으로 진보해왔다. 100Gbps 급의 무선 통신을 위해서는 결국 THz 대역 통신이 사용될 것으로 보이므로, 기술 리더십 확보를 위하여 적극적인 관련 연구 개발 선점이 필요한 시점이다.

용어해설

3GPP 3rd Generation Partnership Project의 약자로서, 이동통신 관련 단체들 간의 표준을 정하는 공동 연구 프로젝트이다. Release 단위로 구조화되어 있으며, 1998년 pre-3G GSM용 Release 98을 시작으로 최근 LTE Advanced 시스템 등의 표준화 작업을 진행하였다.

약어 정리

AMC	Amplifier and Multiplier Chain
ASK	Amplitude Shift Keying
BS	Base Station
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
FEC	Forward Error Correction
FWA	Fixed Wireless Access
MS	Mobile Station
UTC-PD	Uni-Traveling-Carrier PhotoDiode

참고문헌

- [1] J.S. Belrose, "Fessenden and Marconi: Their Differing Technologies and Transatlantic Experiments During the First Decade of This Century," in *Proc. Int. Conf. 100 Years of Radio*, London, UK, Sept. 5-7, 1995, pp. 32-43.
- [2] TTA 보도자료, "5세대 이동통신(5G), 3GPP 글로벌 표준 최종 확정," 2018. 6. 14.
- [3] J. Smith, "Verizon to Use SAMSUNG for First Commercial 5G Network Rollout," ZDNet, Jan.3, 2018.
- [4] SAMSUNG white paper, "Analysis of mmWave Performance," July, 2017.
- [5] T.J. Kim, "A mmWave-Based Mobile Communication System (Giga KOREA-5G)," 5G Global Summit, Dec., 3rd, 2015.
- [6] 이훈, "밀리미터파 기가급 이동통신기술," 한국통신학회 동계 학술대회 특별초청강연, 2016.
- [7] Qualcomm, <https://www.qualcomm.com/videos/mmwave-5g-nr-prototype-demo-video>
- [8] J. Dunworth et al., "A 28 GHz Bulk-CMOS Dual-Polarization Phased-Array Transceiver with 24 Channels for 5G User and Basestation Equipment," *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, San Francisco, CA, USA, Feb. 11-15, 2018, pp. 70-72.
- [9] Anokiwave, <https://www.anokiwave.com>
- [10] Anokiwave, "AWMF-0157 28 GHz Silicon 5G Tx/Rx

- Quad Core IC,” Product Overview.
- [11] B. Sadhu et al., “A 28 GHz 32-Element Phased-Array Transceiver IC with Concurrent Polarized Beams and 1.4 Degree Beam-Steering Resolution for 5G Communication,” *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)*, San Francisco, CA, USA, Feb. 2017, pp. 128-129.
- [12] X. Gu et al., “A Multilayer Organic Package with 64 Dual-polarized Antennas for 28GHz 5G Communication,” *IEEE Int. Microw. Symp.(IMS)*, Honolulu, HI, USA, June 2017, pp. 1899-1901.
- [13] K. Kibaroglu et al., “An Ultra Low-Cost 32-Element 28 GHz Phased-Array Transceiver with 41 dBm EIRP and 1.0-1.6 Gbps 16-QAM link at 300 Meters,” *IEEE Radio Frequency Integr. Circuits Symp.(RFIC)*, Honolulu, HI, USA, June 2017, pp. 73-76.
- [14] Huawei, “Huawei and NTT DOCOMO Mark Milestone in 5G Joint Trials with Successful High-Speed and Long Distance mmWave Field Trial at Tokyo Skytree,” Huawei News, Dec. 7, 2017.
- [15] H.R. Karimi, “Bringing 5G to Reality,” UK SPF workshop:5G, Sept. 18, 2017.
- [16] T. Nagatsuma et al., “Advances in Terahertz Communications Accelerated by Photonics,” *Nature Photonics*, vol. 10, no. 6, 2016, pp. 371-379.
- [17] T. Ishibashi et al., “InP/InGaAs Uni-Traveling-Carrier Photodiodes,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. 83, no. 6, 2000, pp. 938-949.
- [18] NTT Electronics Corporation, UTC-PD Photomixer.
- [19] VDI, VDI AMC-I Standard Product.
- [20] K. Sengupta et al., “A 0.28 THz Power-Generation and Beam-Steering Array in CMOS Based on Distributed Active Radiators,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 12, 2012, pp. 3013-3031.
- [21] A. Hirata et al., “High Directivity Photonic Emitter Using Photodiode Module Integrated with HEMT Amplifier for 10-Gbit/s Wireless Link,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 8, Aug. 2004, pp. 1843-1850.
- [22] A. Hirata et al., “120-GHz-Band Wireless Link Technologies For outdoor 10-Gbit/s Data Transmission,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 3, 2012, pp. 881-895.
- [23] Y.B. Jung et al., “Cassegrain Antenna with Hybrid Beam Steering Scheme for Mobile Satellite Communications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 5, 2009, pp. 1367-1372.
- [24] A. Hirata et al., “5.8-km 10-Gbps Data Transmission Over a 120-GHz-Band Wireless Link,” *IEEE Int. Conf. Wireless Inform. Technol. Syst.*, Honolulu, HI, USA, 2010, pp. 1-4..
- [25] C. Wang et al., “0.34-THz Wireless Link Based on High-Order Modulation for Future Wireless Local Area Network Applications,” *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 4, no. 1, 2014, pp. 75-85.
- [26] I. Kalfass et al., “64 Gbit/s Transmission Over 850 m Fixed Wireless Link at 240 GHz Carrier Frequency,” *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, vol. 36, no. 2, 2015, pp. 221-233.
- [27] X. Pang et al., “260 Gbit/s Photonic-Wireless Link in the THz Band,” *IEEE Photonics Conf.(IPC)*, Waikoloa, HI, USA, Oct. 2016, pp. 1-2.