

面向未来大容量通信的太赫兹无线通信技术*

雷于露¹, 曹浩一¹, 曾泓鑫¹, 董亚洲¹, 冯伟¹, 丁科森¹,
郝晓林¹, 王正¹, 张雅鑫^{1,2}

(1 电子科技大学 成都 611731

2 电子科技大学长三角研究院 湖州 313099)

摘要: 随着现代社会的发展, 信息需求量快速增长, 低频段频谱资源逐渐耗尽, 无线通信频谱开始向着太赫兹波段 (0.1 THz~10 THz) 拓展, 太赫兹通信技术已然成为未来大容量通信的重要发展方向之一。围绕着太赫兹通信技术, 介绍了太赫兹通信特点及其应用场景, 太赫兹通信核心器件的发展, 国内外现有成果对比以及未来可能的发展趋势。同时, 分别对微波光子学太赫兹通信系统、全固态太赫兹混频通信系统和直接调制太赫兹通信系统三种不同架构的系统进行分析和讨论, 并对太赫兹通信技术的发展趋势以及未来应用场景进行了探讨。

关键词: 太赫兹通信技术; 通信系统; 太赫兹通信核心器件; 发展趋势; 应用场景

中图分类号: TN92 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)06-0014-24

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210615001

引用格式: 雷于露, 曹浩一, 曾泓鑫, 等. 面向未来大容量通信的太赫兹无线通信技术[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 14-37.

Terahertz wireless communication technology for future large-capacity communication

LEI Yulu¹, CAO Haoyi¹, ZENG Hongxin¹, DONG Yazhou¹, FENG Wei¹, DING Keseng¹,
HAO Xiaolin¹, WANG Zheng¹, ZHANG Yaxin^{1,2}

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Yangtze Delta Region Institute of University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313099, China)

Abstract: With the development of modern society, the demand of information is exploding, which results in the insufficiency of the low frequency spectrum. The frequency is expanding to terahertz frequency band (0.1 THz~10 THz). Nowadays, the terahertz communication technology has become one of the key trends of future large-capacity communication. Aiming at terahertz communication technology, we will introduce the characteristics and applied scenarios of terahertz communication. The development of core devices and the comparison of present communication system achievements at home and abroad, along with future development trends are illustrated in our article. Meanwhile, terahertz microwave photonics communication system, all-solid state terahertz mixer communication system and direct modulation terahertz communication system are also introduced and discussed as follows. Finally, we present the development tendency of terahertz communication technology and its future applied scenarios.

Key words: Terahertz communication technology; Communication system; Core devices for terahertz communication; Development tendency; Applied scenarios

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210615001

Citation: LEI Yulu, CAO Haoyi, ZENG Hongxin, et al. Terahertz wireless communication technology for future large-capacity communication [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 14-37.

引 言

太赫兹波 (0.1 THz~10 THz) 位于红外和微波之间, 频率资源丰富且尚未进行大规模应用, 与之相

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61931006, 62131007); 国家重点研发计划 (2018YFB1801503)

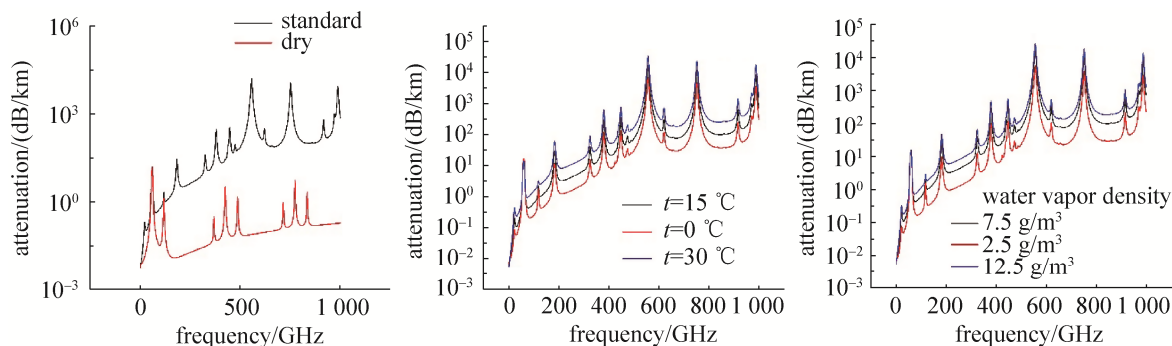
收稿日期: 2021-06-15 收修改稿日期: 2021-09-16

关的无线通信技术因速率高、带宽广、波束宽度适中、保密性强、抗干扰能力强等特点被公认为未来高速通信潜在的关键核心技术之一^[1]。中国、美国、日本、欧盟等均高度重视太赫兹通信技术的发展。

2006 年,美国电气电子工程师学会 IEEE 着手推进太赫兹通信标准化进程。IEEE 802.15 于 2008 年成立的太赫兹小组 IG THz (THz Interest Group) 重点关注 0.275 THz~3 THz 频段的太赫兹通信技术,提出了不同情况下的太赫兹介质访问控制 MAC (Media Access Control) 方案。IEEE 802.15 于 2013 年 7 月成立研究组 IEEE 802.15 Study Group 3d 100 Gbit/s Wireless (SG 3d (100 G)), 主要评估 100 G 标准的有效性,于 2014 年 3 月完成工作并进阶为任务组 TG 3d (100 G)。2017 年,该任务组发布的以 IEEE Std.802.15.3c 为基础的 IEEE Std.802.15.3d-2017 定义了符合 IEEE Std.802.15.3-2016 的无线点对点物理层,其频率范围为 252 GHz~325 GHz^[2],这也是首个 300 GHz 的无线通信标准。国际电信联盟 ITU 指定分配 0.12 THz 和 0.22 THz 频段分别用于下一代地面无线通信和卫星间通信。2019 年 11 月, WRC-2019 会议议题 1.15 最终确定 4 个全球标识的移动业务频段: 275 GHz~296 GHz、306 GHz~313 GHz、318 GHz~333 GHz、356 GHz~450 GHz,并可由各主管部门用于实施具体应用^[3]。这也是 ITU 首次明确了 275 GHz 以上太赫兹频段地面无线电业务的应用可用频谱。2019 年 3 月,美国联邦通信委员会 FCC 宣布,开放未来可能用于 6G 研究的 95 GHz~3 THz 频段作为太赫兹实验频谱。

2019 年 4 月,韩国通信与信息科学研究院召开了 6G 论坛,正式宣布韩国开展 6G 研究并组建了 6G 研究小组;2019 年 11 月 3 日,中国科技部成立国家 6G 技术研发推进工作组和总体专家组,正式启动中国 6G 的规划和研发工作;日本计划通过官民合作制定 2030 年实现“后 5G”(6G)的综合战略^[4]。为统一标准并规划未来发展,各国纷纷发表相关文件。2019 年 3 月,全球首届 6G 峰会在芬兰召开,70 多位各国专家共同商议探讨未来通信发展。基于会上观点,奥卢大学于 2019 年发布了全球首份 6G 白皮书《6G 无线智能无处不在的关键驱动与研究挑战》^[5],展望 6G 未来发展;2020 年 7 月 14 日,韩国三星电子发布的《下一代超连接体验》6G 白皮书系统阐述了对 6G 的愿景以及预期时间表^[6];2020 年 11 月,中国移动研究院发布的《2030+愿景与需求白皮书(第二版)》提出“6G 重塑世界”的宏大目标^[7]。这些对于 6G 的未来展望和深入研究的种种都与太赫兹通信息息相关。

太赫兹波频率高,因此在大气中传输面临着较为严重的大气衰减,在一定程度上限制了太赫兹通信的实际应用场景。根据 ITU 联盟发布的大气信道模型,太赫兹的大气特性如图 1 所示。太赫兹频率在大气中具有几个窗口,从低到高依次为 0.14 THz、0.17 THz、0.22 THz、0.34 THz、0.41 THz、0.65 THz、0.85 THz 等,然而大气中的水汽、氧气等也对太赫兹波有较强的吸收,例如在标准天气(温度 15 °C,水汽密度 7.5 g/m³)下,0.22 THz 大气衰减率约 2.8 dB/km,0.34 THz 大气衰减率约 10.02 dB/km、0.65 THz 大气衰减率约 70.94 dB/km;同时,雨雾天气也会对太赫兹波的传播造成影响^[8]。因此,太赫兹的应用场景很大程度上受限于信号的衰减,需要避开高衰减的频段。



(a) 不同天气状况大气衰减率对比 (b) 不同温度对大气衰减率的影响 (c) 不同水汽密度对大气衰减率的影响
(a) Comparison of attenuation caused by atmosphere in different weather (b) Influence of different temperatures on attenuation caused by atmosphere (c) Influence of different water vapor density on attenuation caused by atmosphere
图 1 太赫兹的大气特性

Fig. 1 Atmospheric characteristics of terahertz

由图 1 可知, 温度大小以及水汽密度的大小均会对大气衰减率有所影响, 水汽密度不变时随着温度升高, 大气衰减率总体呈上升趋势但涨幅不大; 温度保持不变时随着水汽密度增大, 大气衰减率总体呈增大趋势且变化较为剧烈。两种情况下通信窗口的频率均基本保持不变。

太赫兹通信应用场景如图 2 所示。从目前的发展来看, 近地范围太赫兹频段主要可以应用于地面中近距离高速数据回传, 室内场景下的高速局域通信以及体域网 BAN (Body Area Network) 等; 在高空、临近空间以及大气层以外的太空环境, 太赫兹通信将摆脱大气衰减, 实现远距离高速通信。因此, 太赫兹无线通信在星地高速通信(低轨)、分布式卫星群、低轨星座、中高轨信息港以及等离子鞘套测控通信等多个应用场景具有重要的应用前景。

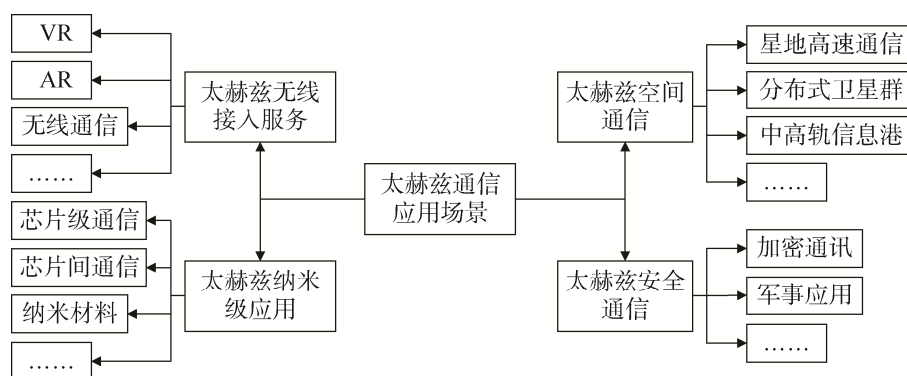


图 2 太赫兹通信应用场景

Fig. 2 Terahertz communication application scene

近十余年, 太赫兹通信技术从通信速率、通信频率、系统体积等方面都得到了飞速提升, 通信速率已经从最早的 10 Gbps 发展到如今的 Tbps 级, 通信频率也从最早的 0.12 THz 发展到今天的 0.3 THz 甚至更高频率。太赫兹通信的迅猛发展离不开器件和芯片关键技术的突破, 本文将从太赫兹核心关键元器件、太赫兹通信系统技术两方面对太赫兹通信技术的发展进行综述。

1 太赫兹通信核心元器件的发展

太赫兹通信系统主要有微波光子学太赫兹通信系统、全固态太赫兹混频通信系统以及直接调制通信系统三类。通常, 太赫兹通信系统包含有线传输以及通过天线辐射的空间传播两种方式, 倍频器、混频器、功放、低噪放、调制器、天线等有关器件在系统中各司其职, 共同完成通信任务。

1.1 太赫兹倍频器

对于太赫兹通信、成像、安检、大气监测等多类系统, 太赫兹倍频链路都是不可或缺的一部分。太赫兹倍频器按照二极管类型可分为异质结势垒变容二极管 (HBV) 倍频器与肖特基平面式二极管 (SBD) 倍频器; 根据倍频器的倍频次数可分为二倍频器、三倍频器及多倍频器; 按照倍频结构来分可分为平衡倍频器和非平衡倍频器; 按照二极管的材料来分, 可分为 GaAs 高效率倍频器、GaN 高功率倍频器、InP 倍频器。由于肖特基二极管具有截止频率高和正向压降低等优点, 且实际应用中往往追求更高效率, 因此国际上通常采用较为成熟的 GaAs 肖特基二极管。而平衡式倍频结构能够抑制非目标谐波, 极大地增大倍频效率, 是倍频器设计的首选结构。

目前, 国内外设计的倍频器基本覆盖了 0.1 THz~3 THz, 如图 3 所示。文献[9]报道了一款采用倒装式肖特基二极管技术的倍频源, 在该设计中二极管采用了金刚石衬底倒装在 ALN 基底上, 在 150 GHz 和 300 GHz 倍频可以承受超过 400 mW 和 100 mW 的输入功率, 并能够分别提供超过 140 mW 和 30 mW 的输出功率。业界针对倒转式结构装配精度不高的问题, 逐步发展采用 GaAs 单片技术来设计太赫兹倍频器件。文献[10]报道了新型毫米波单片倍频器, 该单片倍频器专门针对超高功率运行进行了优化, 在 170 GHz~200 GHz 倍频器的效率约 25%。对该结构进行了镂空操作, 能够很好地减小介质损耗及散热。

为增加高频倍频器的输出功率，文献[11]新引入了片上功率组合拓扑结构，报道了高功率片上功率组合六管芯 490 GHz~560 GHz 三倍频器件及 1.5 GHz~1.7 THz 三倍频器。实验显示，在 550 GHz 频率下的输出功率为 30 mW，同时利用该器件作为倍频源，实现 1.64 THz 频率下输出功率 0.7 mW。针对 GaAs 二极管可承受功率低的问题，文献[12]讲述了高功率 GaN 二极管在倍频器件上的应用，其在 SiC 衬底上制备了用于倍频的 GaN 二极管，当脉冲输入 2 W 时，在 177 GHz~183 GHz 测得输出功率为 200 GHz~244 mW，效率为 9.5%~11.8%。

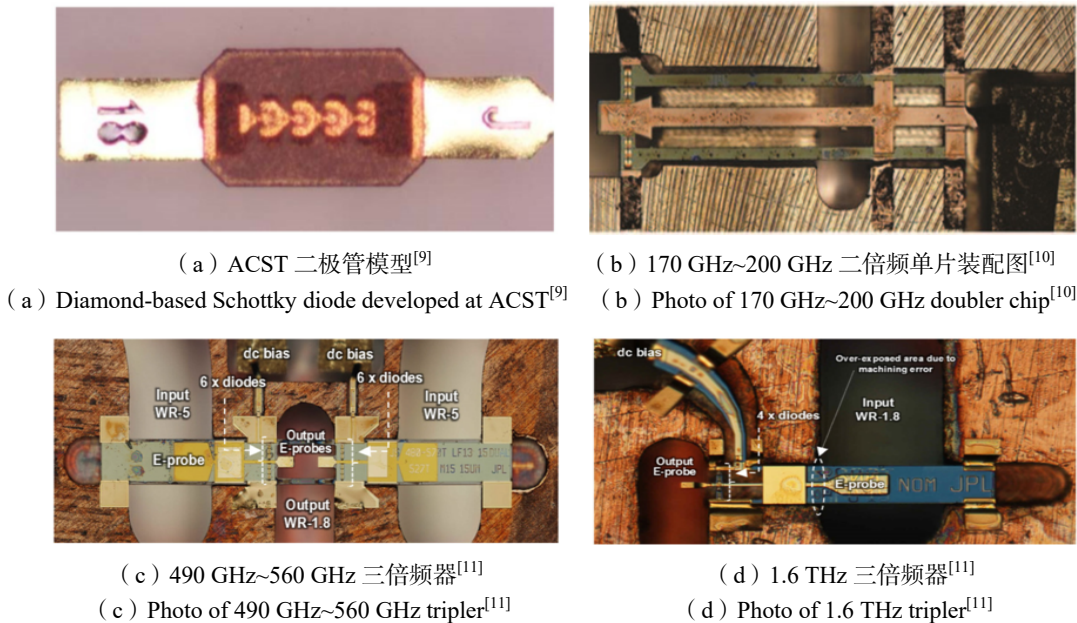


图 3 部分倍频器实物图

Fig. 3 Figure of different frequency multipliers

目前，国内外太赫兹倍频链信号源发展均相对成熟，但是转换效率、输出功率包括集成度这些未来的重要关注指标仍需进一步提升，详见表 1。因此，太赫兹倍频源向着更高的倍频效率、更大的输出功率、更低热噪声及更高的集成度发展，需要探索新结构、新工艺。

表 1 部分倍频器参数

Table 1 Parameters of different frequency multipliers

器件	工作频率 (GHz)	倍频效率 (%)	$P_{out(max)}$ (mW)	时间
二倍频单片	170~200	25	-	2015 ^[10]
二倍频器	270~320	25~35	35	2018 ^[9]
二倍频器	175~185	9.5~11.8	244	2020 ^[12]
非平衡三倍频器	213~221	>5	18.7	2018 ^[13]
平衡式三倍频器	410~510	-	0.1	2019 ^[14]
三倍频单片	430	4.3	0.22	2019 ^[15]
三倍频单片	315~345	2.26	0.451	2019 ^[16]
三倍频器	324~352	6.8	6.8	2020 ^[17]

1.2 混频器

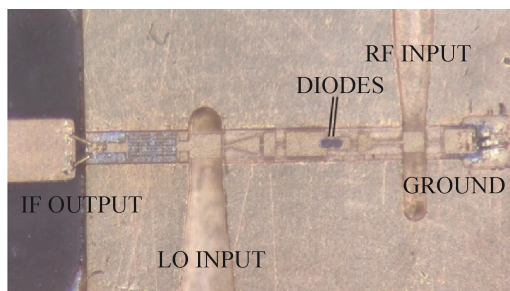
混频器作为通信系统的核心器件之一，在系统中实现上下变频功能，在收发端都有着重要的作用。根据器件采用的非线性元件不同，太赫兹混频器可分为超导热电子 (HEB) 混频器、晶体管混频器、超导隧道结 (SIS) 混频器和肖特基二极管混频器等；按照设计划分，可以分为单端混频器、单平衡混频

器、双平衡混频器、三平衡混频器等;按原理划分,通常有基波混频器和谐波混频器。基于平面肖特基二极管的谐波混频器因具有变频损耗低、动态范围大、噪声系数低、工作带宽较宽、可工作于室温条件等优点,应用最为广泛。国内外对于混频器的实现方式有单片集成(TMIC)和混合集成(HMIC)两种形式。部分混频器参数见表 2。

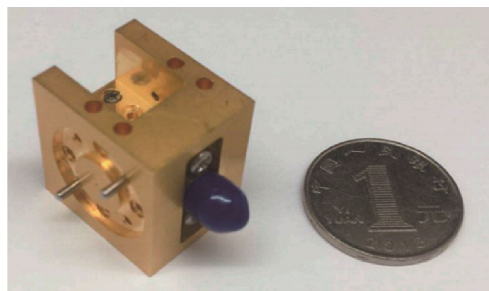
表 2 部分混频器参数
Table 2 Parameters of different mixers

器件	工作频率 (GHz)	变频损耗 (min) (dB)	时间
二次谐波混频器	317~367	5.5 (DSB)	2017 ^[18]
三次谐波混频器	198~228	24	2018 ^[19]
二次谐波混频器	360~440	9.99	2018 ^[20]
二次谐波混频器	320~340	15	2019 ^[21]
二次谐波混频器	173~191	8.1 (SSB)	2020 ^[22]
四次谐波混频器	640~700	16.8 (SSB)	2020 ^[23]
二次谐波混频器	600~667	12 (SSB)	2020 ^[24]
二次谐波混频器	540~580	8 (DSB)	2021 ^[25]

文献[25]采用了半全局半分布的方法设计了一款 560 GHz 分谐波混频器。在注入本征功率为 3 mW 时,在频段 565 GHz~585 GHz 范围内,实测双边带变频损耗仅为 8 dB,性能优异,如图 4 所示。



(a) 混频器石英电路
(a) Quartz circuit of mixer



(b) 腔体照片^[25]
(b) Photo of cavity^[25]

图 4 560 GHz 谐波混频器

Fig. 4 Overall structure of 560 GHz sub-harmonic mixer

根据肖特基二极管的非线性特性可知,混频器的产物不止有目标频率,还有基波以及许多其他不必要的杂波频率。为了过滤出目标频率就需要对二极管以及滤波电路进行不断优化,这也在无形中增加了电路的复杂程度。在实际应用中,谐波混频器本振信号利用率不高,肖特基二极管对功率敏感,易击穿,这对未来混频器设计提出了更高的要求。

目前,国内采用较多的制造工艺是混合集成技术,工艺要求不高且性价比更优,设计较其他工艺更为灵活,但缺点是可能会因为装配原因引入误差;国外 500 GHz 以上的频段多采用单片集成工艺,性能更好的同时一定程度上降低了驱动功率,但该工艺受限于材料等因素,性能优化具有上限,对制造工艺的要求也更为严苛。随着集成二极管的发展,肖特基二极管混频器将逐步向着低变频损耗、高频段、更低的温度噪声、更高的集成度发展。

1.3 功率放大器

太赫兹频段由于频段高、路径损耗大,同时还伴有较强的大气吸收,对发射功率提出了更高的要求,因此,功率放大器的性能在一定程度上决定了太赫兹通信系统的通信距离。对于太赫兹功率放大器而言,输出功率、增益、线性度、带内平坦度、带宽等多个指标决定着放大器的性能^[26]。目前,太赫兹信号功率放大器有固态功放和真空电子学放大器两类,前者可以达到几百毫瓦的水平,体积和功耗较小,可实

现集成化，已接近实际应用水平；后者高达几十瓦，但是由于体积和功耗的限制，主要应用于一些特殊场合^[27]。用于太赫兹频段的半导体功率放大器件按照半导体材料可以分为 Si 器件和 III-V 族化合物基器件，适用于放大电路的两类工艺有 GaN HEMT 和 InP HBT，GaN HEMT 功率更高，但其工作频率发展至 300 GHz 以上具有较大难度；InP HBT 相对 GaN HEMT 而言，击穿电压相对高，功率容量大，增益平坦度好，适合功放，且 InP HEMT 噪声系数低更适合发展低噪声放大器。部分功率放大器参数见表 3。

表 3 国内外部分功率放大器参数
Table 3 Parameters of amplifier at home and abroad

工艺	工作频率 (GHz)	$Gain_{max}$ (dB)	P_{sat} (mW)	时间
25 nm InP HEMT	750~1 100	9	-	2015 ^[28]
500 nm InP DHBT	140~220	20	0.54	2016 ^[29]
250 nm InP DHBT	185~255	17	248	2017 ^[30]
500 nm InP DHBT	210~220	15.4	>3.55	2018 ^[31]
500 nm InP DHBT	275~310	12.5	-	2018 ^[32]
35 nm InGaAs mHEMT	280~320	13.5	7.2	2019 ^[33]
500 nm InP DHBT	220	>10	20	2020 ^[34]

太赫兹固态放大器的发展依托于半导体技术的发展，GaN HEMT、InP HEMT、InP HBT 等化合物将功率放大器推向不同的发展方向。InP HEMT 基器件特征尺寸目前已达 25 nm，最大振荡频率为 1.5 THz，文献[28]已经可以实现在 1 THz 处增益 9 dB；InP HBT 基器件特征尺寸达到 130 nm，最大振荡频率超过 1.1 THz，文献[30]已经实现在高于 200 GHz 处的输出功率高于 200 mW。文献[30]的三级十六路的功率放大芯片测试得到，在 200 GHz~255 GHz 范围内小信号增益大超过 24 dB，饱和输出功率在 200 GHz 处达到 248 mW，功率增益为 9 dB，功率附加效率可以达到 4.1%，实现了高功率、高增益输出。部分放大器显微照片如图 5 所示。

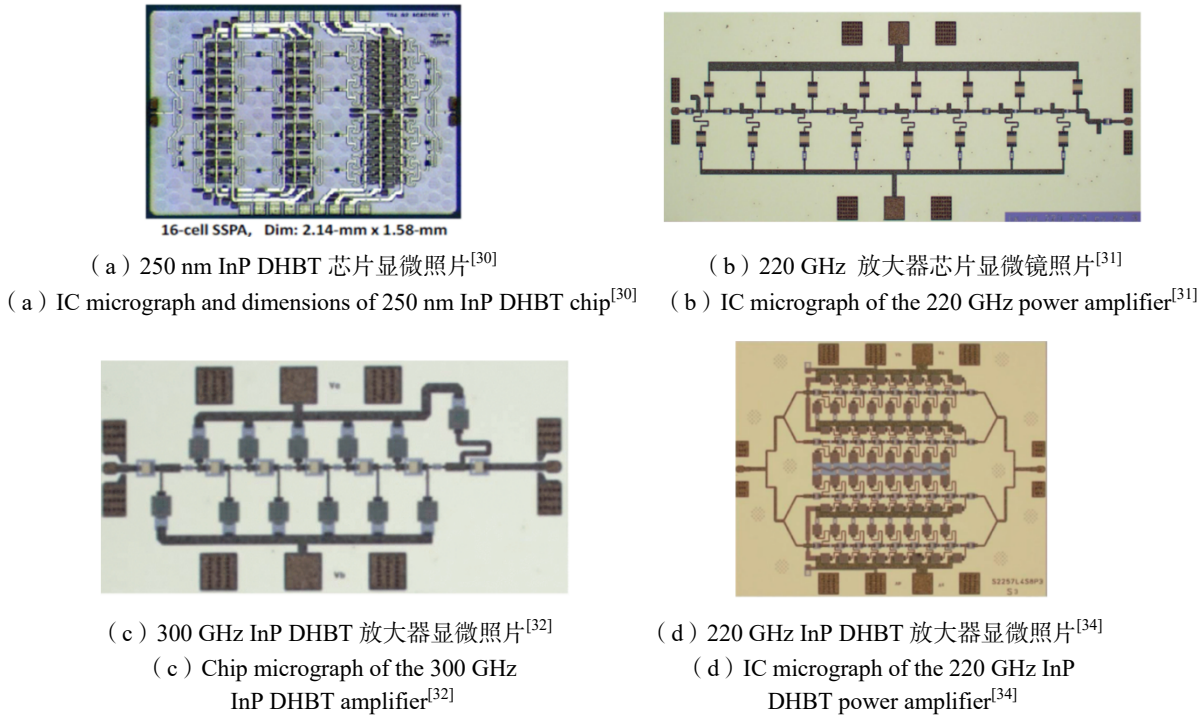


图 5 部分放大器显微照片
Fig. 5 Partial amplifier micrographs

在半导体工艺允许的情况下, 未来太赫兹频段放大器会逐步向着高增益、宽带宽、输出功率大、增益平坦度好的方向发展。

1.4 低噪声放大器

低噪声放大器作为太赫兹通信系统接收端核心器件, 主要用于小信号放大、抑制后级噪声, 其线性度、噪声系数、增益对系统接收机的噪声系数、灵敏度都有着重要的影响。低噪放分为宽带和窄带, 可用于相应收发系统, 宽带低噪放因兼容性更高受到更多关注。低噪放通常采用的工艺材料为 GaAs、InP、硅基 CMOS。GaAs 材料损耗小、电子迁移率高, 在毫米波频段体现出线性度好、增益高的特点, 但在太赫兹波段, GaAs 材料的噪声系数和截止频率限制了其进一步的发展; 硅基 CMOS 工艺成熟, 价格低廉, 易于与数字模块兼容, 但是受工艺限制, 在太赫兹波段性能有所下降; InP 材料电子迁移率高, 稳定性较好, 热耗散能力强, 频率响应特性较高, 集成度更高, 因此, InP-HEMT 是太赫兹低噪声放大器电路设计的主流设计工艺。

表 4 部分低噪声放大器参数

Table 4 Parameters of different low noise amplifiers

工艺	工作频率 (GHz)	增益 (dB)	噪声系数 (dB)	时间
35 nm InP HEMT	160~270	15~25	7~8	2012 ^[35]
50 nm GaAs MHEMT	165~183	19~20	4.4~7.4	2014 ^[36]
250 nm InP BiCMOS	75~110	27.7	5.7~6.8	2014 ^[37]
35 nm InP HEMT	200~240		4.8~5.2	2014 ^[38]
65 nm CMOS	110~122	13.8	10.8	2017 ^[39]
InP MMIC	210~220	>13	8.2~8.8	2018 ^[40]
InP BiCMOS	215~242	17.7	11.5	2019 ^[41]

根据表 4 可知, 太赫兹频段低噪放的噪声系数正在不断优化, 增益也在不断提高。2012 年, 文献[35]采用 35 nm InP HEMT 设计的低噪放在 160 GHz~270 GHz 频段范围内实现了 15 dB~25 dB 的增益, 而且实现了不到 8 dB 的噪声系数; 文献[36]采用 50 nm GaAs MHEMT 工艺在 165 GHz 和 183 GHz 实现了 7 dB 的噪声系数, 频段范围内实现 19 dB~20 dB 的增益; 文献[38]于 2014 年使用集成工艺, 采用 50 μm InP 基板和 35 nm HEMT 晶体管, 在 200 GHz~240 GHz 频段范围内实现了近 5 dB 的噪声系数, 噪声较小。不同低噪放显微照片如图 6 所示。

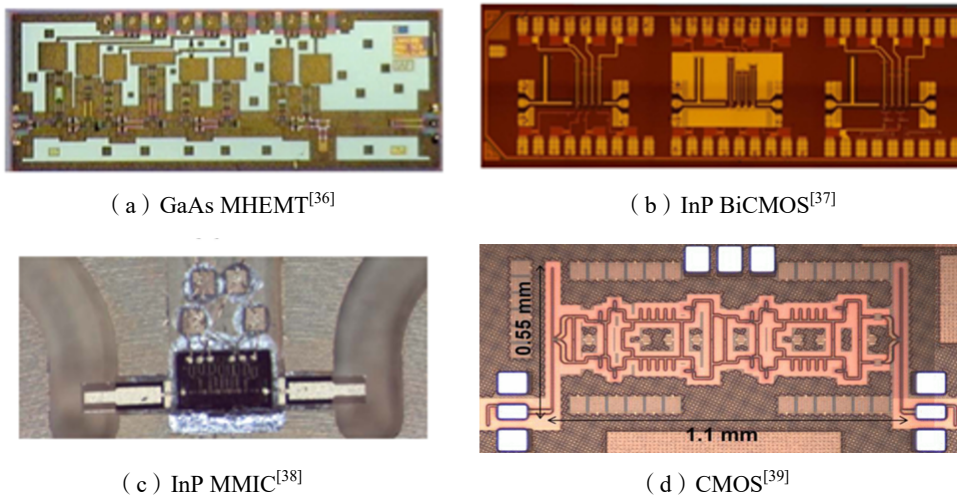


图 6 不同低噪放显微照片

Fig. 6 Photograph of different LNAs

结构方面,器件的发展将不再局限于 L 型网络或 T 型网络匹配;对通信系统的通信要求越来越高,低噪放新的结构也会应运而生。材料方面,硅基 CMOS 材料将持续受到关注,其工艺也会不断提升以满足器件需求;InP 材料制造工艺将逐步成熟从而使得 InP 得以大规模生产,降低器件成本。未来,太赫兹波段的低噪放将逐步向着更宽的带宽、更低的噪声系数、更高增益的方向发展。

1.5 直接调制器

全固态太赫兹通信系统的研究按调制方式可以分为混频调制和直接调制两种。混频调制是基带信号通过混频从而上变频到达太赫兹波段,该类通信系统受限于 AD/DA 带宽,一定程度上掩盖了太赫兹波超宽带的优势;直接调制是直接在太赫兹源上加载信号,系统复杂度低、可将数字信号直接加载至太赫兹载波上,因此,直接调制器是其关键核心。太赫兹直接调制方法通常采用超表面和半导体结合的准光型阵列调制器,该器件面向自由空间传输调制的太赫兹波;采用将太赫兹调制和集成电路结合的方式设计的片上调制器件,面向集成化系统、片上传输太赫兹波进行高速调制。前者发展较早,2006 年以来,部分学者将半导体材料和金属超表面结构结合后实现了外界刺激对空间太赫兹波的动态调控,之后科学家们研制了以不同种半导体材料为核心的调制器从而对空间太赫兹波进行调控。调控按照激励方式分,可以分为电控、温控、光控;按照调制的物理量分,可以分为幅度、相位、频谱和轨道角动量调制器等。表 5 例举的调制器大部分是源于超表面和半导体结合的太赫兹调制器。

表 5 国内外部分调制器参数

Table 5 Parameters of modulator at home and abroad

工作频率 (GHz)	工作体制	调制方法	调制速度或响应时间	调制深度 (%)	时间
75~110	电控	Nb 材料	100 kHz	45	2012 ^[42]
345	电控	NbN 超材料	1 MHz	79.8	2017 ^[43]
860	电控	GaAs-HEMT	2.7 MHz	80	2017 ^[44]
250	电控	2DEG	-	96	2017 ^[45]
217	电控	空域 SO-ASK 调制	-	-	2017 ^[46]
630	电控	复合结构	30 ps	54	2018 ^[47]
500~1600	电控	石墨烯	10 kHz	99.3~99.9	2018 ^[48]
340	电控	2DEG	3 GHz	93	2019 ^[49]

多种半导体材料与金属超表面以不同的组合方式以及器件结构应用于调制器的设计,在实现调制器基本目标的同时也有很多新亮点,如图 7 所示。文献[45]利用在槽线中传输太赫兹波与二维电子气产生相互作用,间接控制太赫兹波的传输,在 0.25 THz 时器件调制深度可达到 96%且插入损耗小,大约只有 1 dB~2 dB;文献[47]在调制的同时利用 VO₂ 的相变特性可以实现数据的存储和擦除;文献[48]首次证明石墨烯的电导率可以通过电流控制从而产生可变的布鲁斯特角,并研发了相位可调度达到 140°的超宽带相位调制器,调制深度大于 99.3%的 THz 幅度调制器;文献[49]通过电流控制交错网状的二维电子气体 (2DEG) 复合超表面,使之在集体状态和个体状态转换从而可以有效抑制寄生模式并显著降低元表面的电容,其调制性能也较为优秀。除此之外,文献[46]采用集成电路法,通过对于天线阵列单元的开关控制从而影响太赫兹信号的输出功率最终实现对太赫兹信号的调制;文献[50]于 2010 年采用 GaAs 材料并利用光控法实现了 0.78 rad 的相位调制。综合来讲,目前电控法的调制器调制速率相比其他方式的更高,有部分已经能达到 GHz 级别,部分成果已经实现了眼图传输,可以直接应用于通信系统,但是目前的研究成果仍停留在实验室中而无法满足实际应用。除此之外,调制器阵列由多个独立单元组成,单元数目庞大,相应的寄生电容影响增大会影响调制速率,设计难度随之增大;与此同时器件难以小型化,阻碍相应系统的集成化进展。近年来,崔铁军院士提出的编码超材料形式可将发射、调制、通信复用一体化,为这类调制器在太赫兹通信的应用提供了重要的发展方向。

片上太赫兹调制器这一概念近几年才被提出,研究相对较少。2020 年,电子科技大学的张亭等人提

出了一种基于鳍线加载二极管动态微结构的片上太赫兹波调制器。静态测试结果表明该器件在 192 GHz 附近时具有 23 dB 调制深度, 220 GHz 动态测试链路中该器件具有 20 GHz 的高速调制能力, 通信速率为 10 Gbps 时误码率仅 2.617E^{-11} [51]; 同年, 电子科技大学的侯旭等人提出的可调金属线太赫兹直接调制器实现了太赫兹直接调制, 该器件在 340 GHz 工作频率下可实现 13 GHz 的响应速率, 眼图测试显示, 其具备有 4 Gbps 的实际数据传输能力[52]。

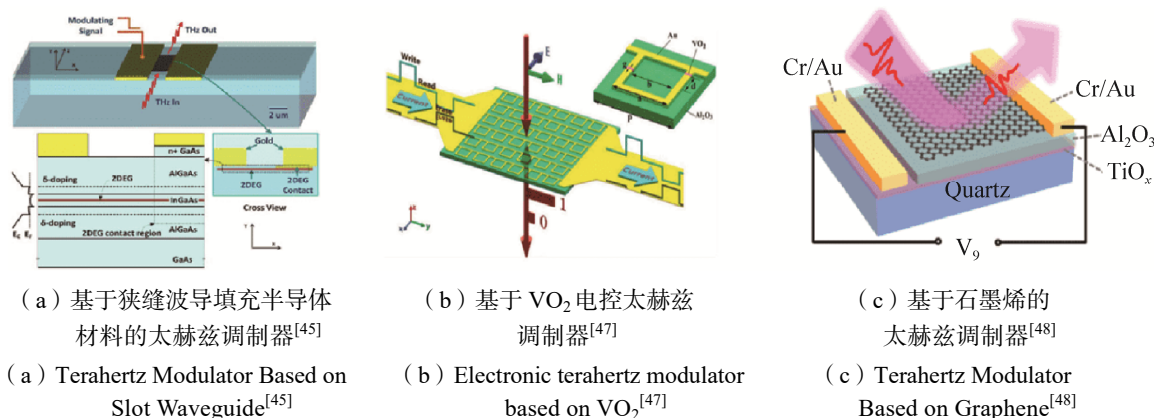


图 7 部分调制器示意图

Fig. 7 Partial modulator diagram

相比而言, 片上太赫兹调制器具有稳定性高、便于集成、速率快的优点。在未来, 除了对调制器本身结构优化之外, 半导体材料技术的不断深入研究将使得调制深度更深、调制速度提升、拥有更高的信息传输速率, 从而面向容量更大、速度更高的通信系统。

1.6 天线

由于太赫兹波在大气中衰减较大, 因此, 太赫兹通信天线通常采用高增益天线。为达到高增益的设计需求, 天线的电大尺寸往往能达到几百倍波长, 但是天线的馈源和馈电结构属于尺寸小于波长的精细结构, 该精细结构的设计往往需要采取专用的多尺度电磁仿真技术进行[27]。高速远距的太赫兹波段通信系统通常需要工作频带宽、增益高的天线, 通常采用透镜天线和卡塞格伦天线。透镜天线通常采用对太赫兹波具有较好透射性的材料制备, 虽然体积重量较小, 但是增益相对卡式天线较低。由于路径损耗较大, 长距离通信时通常会使用增益更高的卡塞格伦天线, 其波束角度一般不大于 1° [53]。根据天线结构设计、材料、实现工艺的区别, 其研究方向也不尽相同。

2013 年, Junfeng Xu 等人利用低温共烧陶瓷工艺实现了一种高增益背腔菲涅耳波带盘型 (Fresnel zone plate) 透镜天线, 在 270 GHz 处增益 20.8 dBi, 3 dB 带宽为 9.1 GHz (266.2 GHz~275.3 GHz) [54]。2014 年, Inoue M 等人设计的一款超宽带缝隙渐变天线, 可在 120 GHz~300 GHz 范围内实现 10 Gbit/s 数据传输[55]。2015 年, Nacer Chahat 等人利用微机械技术设计了一种多角度喇叭天线, 在 1 700 GHz~2 100 GHz 频段范围内实现了 31.7 dBi 的增益, 交叉极化低于 -22 dBi, 旁瓣电平低、回波损耗良好、波束圆度良好[56]。同年, XiaoDong Deng 等人通过标准 0.13 μm 锗化硅 Bi CMOS 技术实现了 340 GHz 太赫兹片上天线, 在工作频率处获得最大增益 7.9 dBi, 辐射效率达 48%[57]。2016 年, 日本的 Alvaro Gonzalez 等学者采用一种独立于频率的准光学设计方法对波纹喇叭天线建模, 其设计的天线频率超过了 1.57 THz, 极化效率超过 99.6%[58]。2019 年, Hossein Davoudabadifarahani 等人设计了一款贴片天线, 辐射效率超过 77.5%, 带宽覆盖 0.434 THz~1.684 THz (118%), 最大增益为 5.72 dBi, 若应用分形结构还可以延长其传播路径[59]。部分天线图片如图 8 所示。

对于太赫兹频段而言, 高增益、低旁瓣、低交叉极化、高隔离度的天线能使信号在空间传播过程中减少耗散从而提升通信水平。由于天线尺寸与频率息息相关, 频率越高, 尺寸越小, 便于系统的集成化从而提升工作性能, 但这同时也对工艺提出了更高的要求。为提高信号利用率和可靠性, 大规模

MIMO 技术应运而生。未来系统所涉及的天线数量也将不断增多, 同等带宽下信息传输速率也将得到飞升, 这也意味着该技术亟待优化, 如阵列单元分组及控制、减少信道间干扰、降低整个系统的能量消耗等。此外, 太赫兹高速跟瞄技术对于太赫兹相控阵天线提出了更高的要求, 虽然本文没有展开讨论该问题, 但是太赫兹相控阵天线的发展, 也促使未来感通一体的太赫兹通信系统寻求更先进的天线技术。

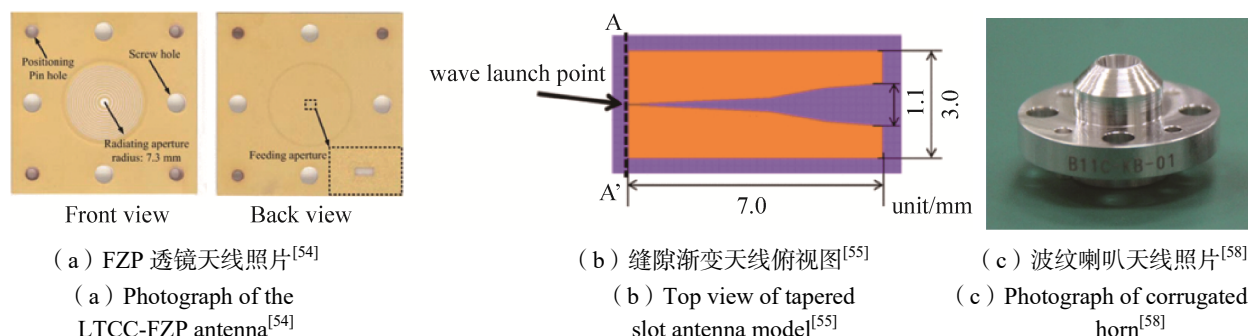


图 8 部分天线图片

Fig. 8 Partial antenna images

2 太赫兹通信系统架构

如前所述, 太赫兹通信系统架构可分为三类, 接下来就重点针对这三类系统进行介绍。

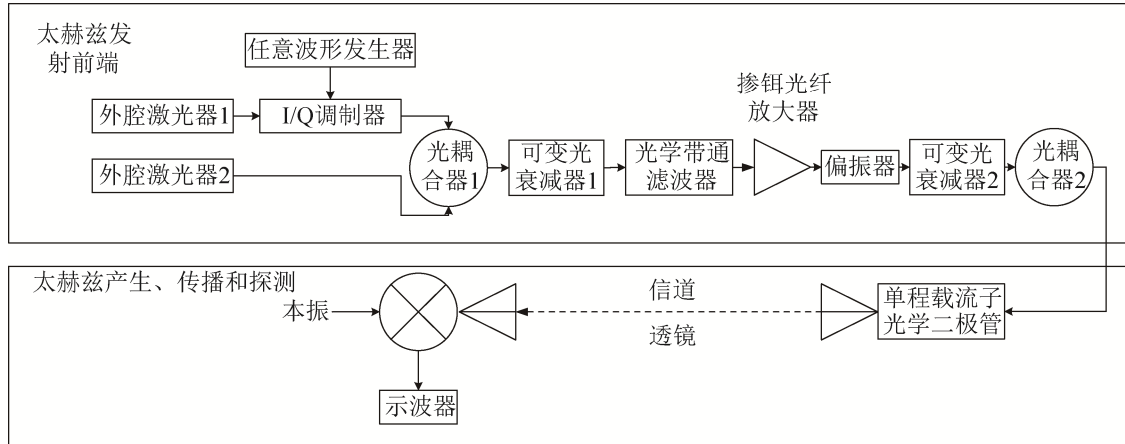
2.1 微波光子学太赫兹通信系统

因为采用光学方法相对更容易得到低相噪的太赫兹信号, 所以微波光子学的太赫兹通信系统是最早在无线通信技术方面开展研究的系统。其实现方法一般基于光电结合的技术途径, 主要分为单光源系统和双光源系统, 优点主要是带宽利用率高并且信号的相噪低^[60]。前者是用单激光器产生的光信号, 经过调制后用光学滤波器滤出所需频段的信号以此进行外差。此系统中输出信号的相位噪声小, 但是对光学滤波器的品质因子要求高, 它和双光源系统最主要的差别在于其差频信号是来自同一激光器滤波后不同频率的两个光信号, 故其相位相关性较好^[60]。双光源系统是使两束不同频率的激光生成毫米波波段的差频信号, 系统结构简单; 在调制方式上, 可以实现单边带、双边带和载波抑制双边带调制; 编码方式可以实现幅移 (ASK)、相移 (PSK)、频移键控 (FSK)、二元调制开关键控 (OOK) 和多进制正交幅度调制 (MQAM)^[60,61]。这种系统优点在于光频段带宽宽, 同时传输速率高, 其缺点在于太赫兹波段光电转换效率低、发射功率低, 同时系统复杂度较高^[62]。

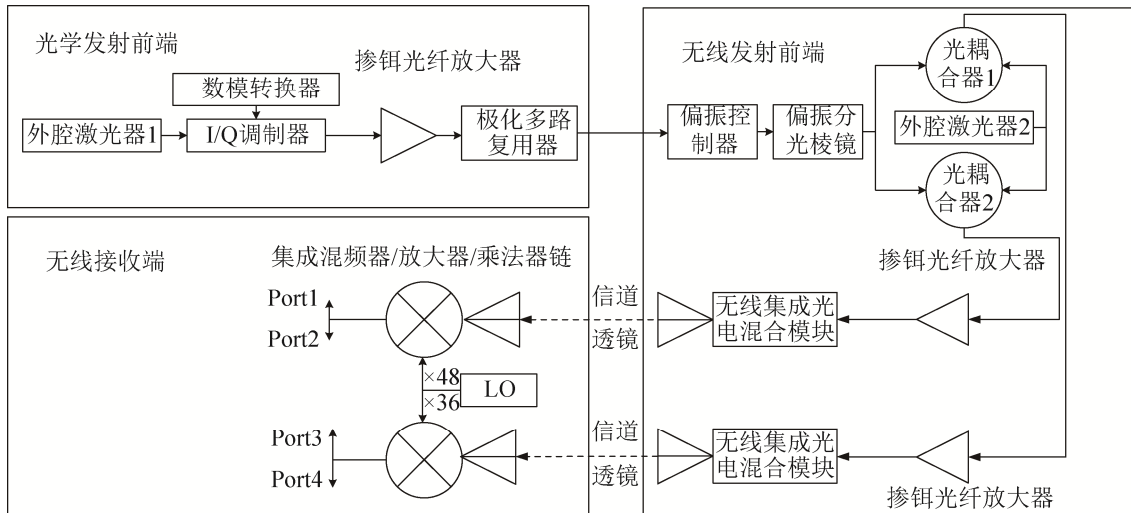
在系统构成上, 基于光电结合方法下的通信系统一般器件包括激光器、马赫曾德调制器 (MZM)、光纤放大器 (EDFA) 和单行载流子光电二极管 (UTC-PD) 等。激光器产生的信号通过马赫曾德调制器进行调制, 采用掺铒光纤放大器对调制信号进行放大, 通过单行载流子光电二极管将放大并滤波处理后的信号转化成可以进行传输的太赫兹信号后进行传播。将微波光子学的一些典型系统构架列举如下, 其中图 9 (a)~图 9 (d) 分别展示了典型的双光源外差系统、偏振复用的远程外差 MIMO 型系统、基于光频梳的系统和基于集成激光器的系统。

使用光电结合的方法进行系统层面的研究, 日本电信 (NTT) 附属的微系统集成实验室是国际上最早开展太赫兹无线通信技术研究的团队, 早期利用此方法开展了 120 GHz 无线通信系统的研究, 在 2006 年实现了在这一频段下 10 Gbps 的传输速率^[67], 之后在频率和传输速率上又进行了更深入的研究^[68]。西班牙卡洛斯三世大学在 2018 年构建了 330 GHz 通信系统, 实现了在此频段下 18 Gbps 的传输速率^[69]。韩国电子与电信研究所在 2021 年也构建了在 300 GHz 下 90 Gbps 传输速率的系统^[70]。以德国卡尔斯鲁厄理工学院在 2019 年构建的系统为例, 该系统在发射和接收端采用了光纤到太赫兹和太赫兹到光纤的转换, 发射端由激光器产生的光信号通过本地振荡器进行下变频为太赫兹信号, 利用在 3 dB 点

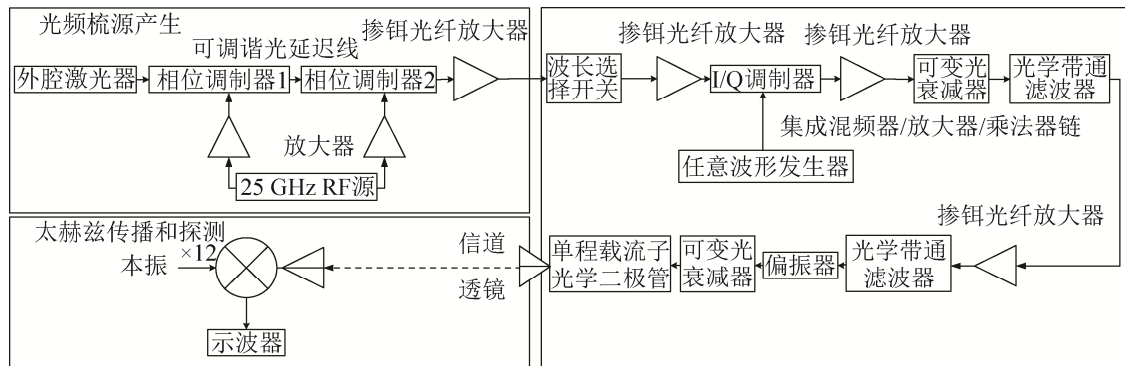
有 0.36 THz 的超宽带硅等离子体调制器, 构建了载波频率在 0.288 5 THz 下的通信系统, 实现了在 16 m 的距离上 50 Gbps 的信号传输速率。其实物测试如图 10 (a) 所示, 左端是其发射端, 右端为其接收端^[71]。

(a) 典型双光源外差^[63]

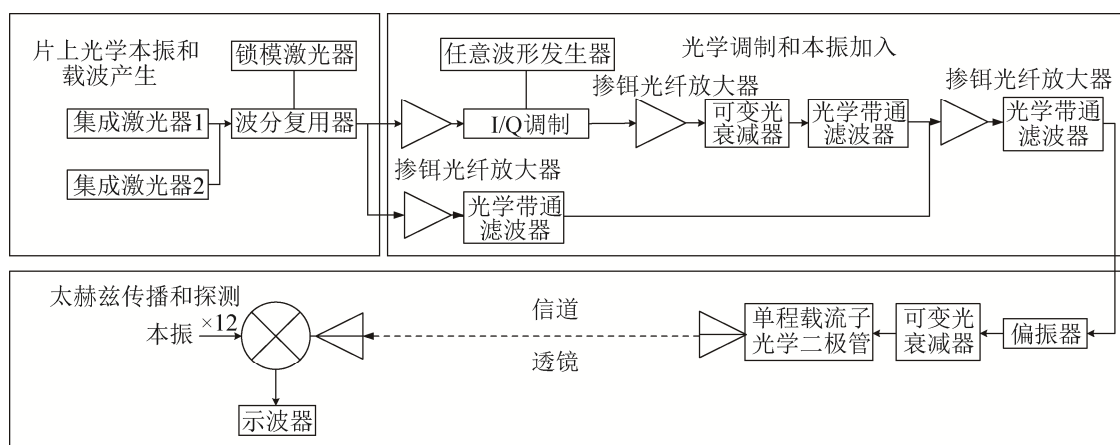
(a) Typical dual source heterodyne

(b) 极化复用 MIMO^[64]

(b) Polarization multiplexing MIMO

(c) 光频梳^[65]

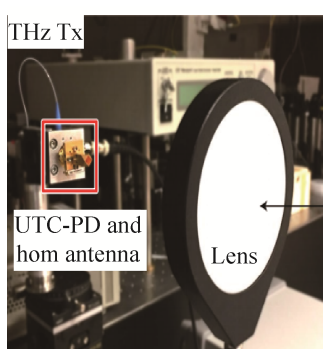
(c) Optical frequency comb

(d) 集成双分布反馈激光器^[66]

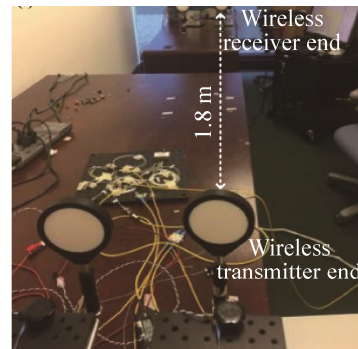
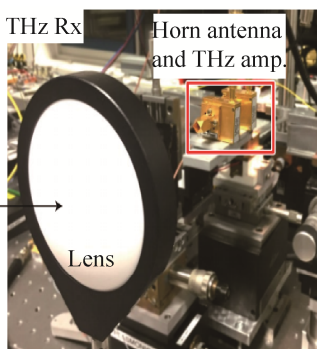
(d) Integrated dual distributed feedback laser

图 9 微波光子学的典型系统构架

Fig. 9 Typical system architecture of microwave photonics

(a) 0.36 THz 通信系统实物图^[71]

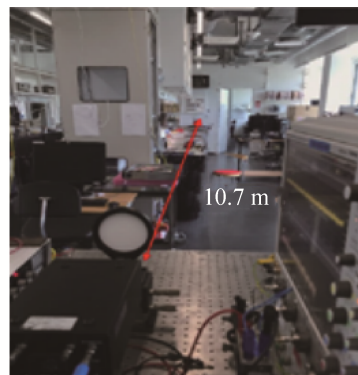
(a) 0.36 THz communication system

(b) 0.45 THz 通信系统实物图^[64]

(b) 0.45 THz communication system

(c) 0.4 THz 通信系统实物图^[65]

(c) 0.4 THz communication system

(d) 408 GHz 通信系统实物图^[66]

(d) 408 GHz communication system

图 10 德国卡尔斯鲁厄理工学院构建的通信系统测试实物图

Fig. 10 The communication system test diagram constructed by Karlsruhe Institute of Technology in Germany

国外部分进展较新的微波光子学通信系统参数见表 6。

近年来,微波光子学的通信系统更朝着高频率和 Tbps 级的高传输速率不断发展。2016 年,美国加州大学已实现了 $8 \times 8 \times 40$ Gbps (2.56 Tbps) 硅基集成芯片的设计制作,华为公司也实现了 42×28 Gbps

(1.2 Tbps) 硅基芯片的制作。2018 年, 日本光电子工业和技术开发协会基于 40 nm 工艺设计出每平方厘米 1.2 Tbps 芯片。2020 年, 英特尔公司也设计出 1.6 Tbps 传输速率的硅基集成电路。

表 6 国外部分微波光子学通信系统

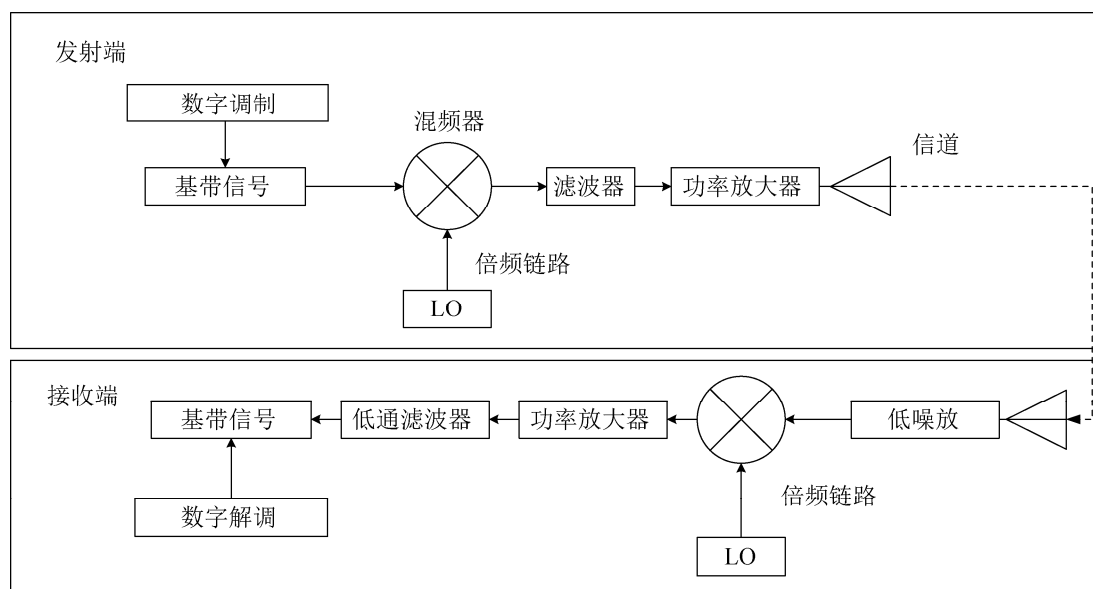
中心频率 (GHz)	速率 (Gbps)	距离 (m)	时间
120	10	>200	2006 ^[67]
300	40	0.5-1	2013 ^[72]
200	10	0.18	2014 ^[62]
300	100	0.05-0.1	2016 ^[73]
光纤 (1 529 nm~1 562 nm)	400	216 000 (光纤)	2016 ^[74]
400	106	0.5	2018 ^[65]
330	18	/	2018 ^[69]
300	10	0.3	2018 ^[75]
350	100	2	2018 ^[76]
288.5	50	16	2019 ^[71]
408	131	10.7	2019 ^[66]
310	10 (单路)	58	2019 ^[77]
450	132	1.8	2019 ^[78]
320~380	612.65 (2×300)	2.8	2020 ^[64]
600	15	0.001~0.01	2020 ^[79]
350	119.1	26.8	2020 ^[80]
300	90	1.4	2021 ^[70]

对于基于光电结合方法下的微波光子学通信系统, 因为提高滤波器品质因子有一定难度, 采用双光源差频产生太赫兹信号的方法更为普遍。与此同时, 对单行载流子光电二极管 (UTC-PD) 的研究也是这种方法的核心。该方法最大的优势在于可充分运用太赫兹频段的大带宽优势, 将光纤宽带通信与无线通信相结合, 极有可能成为未来光电一体高速网络的核心技术, 但是提高系统效率、发展硅光集成芯片也是该方法下系统面临的重要发展方向和瓶颈难题。

2.2 全固态太赫兹混频通信系统

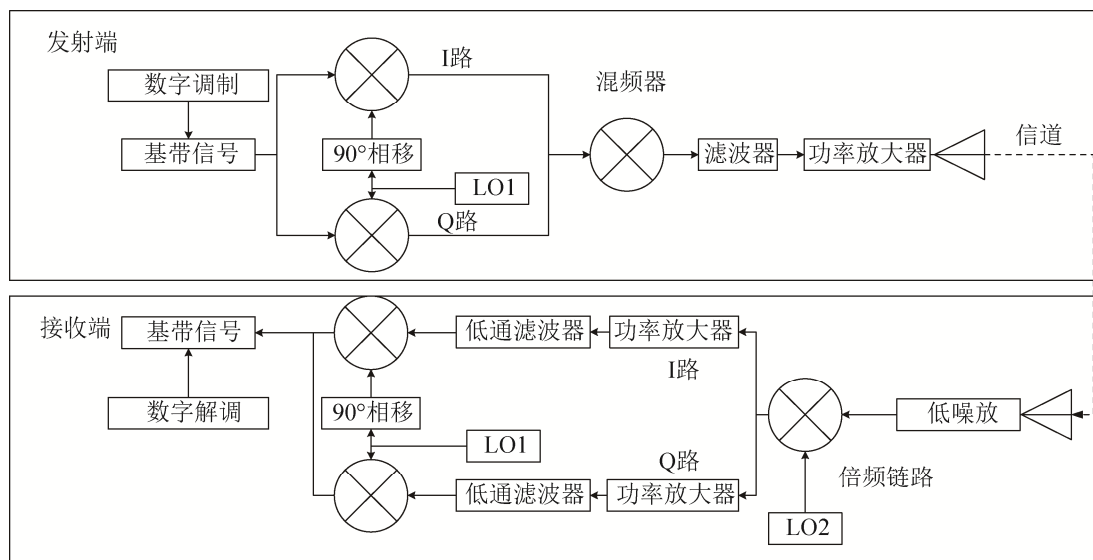
全固态混频通信系统是通过利用全电子学的太赫兹器件实现将中频的调制信号上变频为太赫兹信号。该系统射频前端通常是采用太赫兹倍频链路作为信号源, 太赫兹混频器作为基带上变频到太赫兹的关键器件, 也是从低频率主流通信技术发展而来的一项太赫兹通信技术。该系统的最大优势在于技术成熟度高、功耗低、体积小、容易进行集成化设计, 是目前太赫兹通信技术最主流的技术之一。全固态混频系统实现的方法 (除复用技术外) 主要有两种: 一种是直接对单路基带信号进行混频, 另一种是对基带信号进行 I/Q 调制后进行混频, 其结构如图 11 所示。前者在发射端将基带信号和本振信号进行混频后再发射, 后者是对基带 I 路和 Q 路的信号与本振进行混频后再发射。

日本 NTT 实验室同样也是对全固态电路进行研究的一个重要团队。在随着逐渐转向采用全固态电子学方法实现无线通信系统的研究中, NTT 开展了基于 InP HEMT 器件的太赫兹器件和系统的研究^[81], 同时也对多种调制方式 (ASK\BPSK\QPSK 等) 进行研究, 在 2013 年, 他们实现了在 120 GHz QPSK 调制下进行 170 m 传输时速率达 11.1 Gbps 的成果, 以及在 ASK 调制下进行 5 800 m 传输时速率达 10 Gbps 的成果^[81,82]。与此同时, 美国圣何塞州立大学采用 CMOS 工艺研制了基于 OOK 调制的 0.21 THz 无线通信系统, 实现了 0.01 m 条件下 10.7 Gbit/s 伪随机数据。德国卡斯鲁厄理工学院 (KIT)、弗劳恩霍夫协会应用固态物理研究所 (Fraunhofer IAF) 等机构的研究团队也针对 220 GHz 进行的一系列研究^[83,84]。国内, 电子科技大学、中国工程物理研究院等机构院校也对此展开研究^[85,86]。



(a) 单路混频

(a) Single channel mixing



(b) I/Q 混频

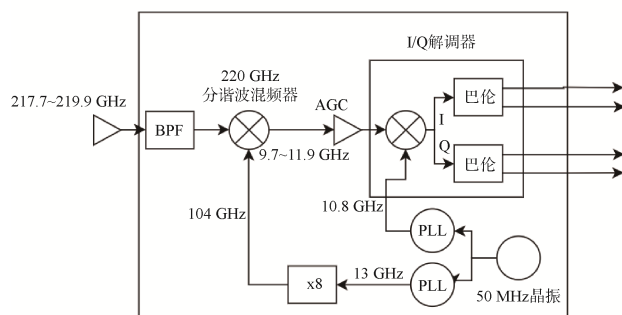
(b) I/Q channel mixing

图 11 全固态混频系统实现的方法示意图

Fig. 11 Method diagram of all solid state mixing system

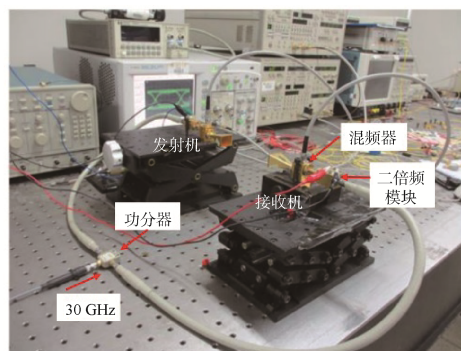
构造上,以电子科技大学的 220 GHz 固态通信系统为例,如图 12 所示,在接收端,该系统采用超外差的接收方式,利用对本振的 IQ 调制和对基带数据信号的 4QAM 调制(正交相移调制),实现了在 220 GHz 相隔距离 200 m 下传输速率达 3.52 Gbps 的裸眼 3D 高清视频信号传输^[85]。该系统结构包括 20 MHz 晶振、巴伦、IQ 混频器、220 GHz 混频器、倍频器等器件。4QAM 调制的基带信号与本振通过锁相环的 10.8 GHz 信号进行 IQ 调制,调制信号通过功放后,与通过多个倍频器实现 8 倍频的 104 GHz 本振信号进行混频。其中,系统采用分谐波混频器使射频信号升高,通过带通滤波器选择中心频率为 218.8 GHz 的射频信号,再通过卡塞格伦天线进行信号发射。接收端采用和发射端类似的镜像设计。此外,2019 年~2020 年,电子科技大学和工程物理研究院微电子与太赫兹中心均实现了 16QAM 20 Gbps

的 IQ 调制系统, 且传输距离大于 1 km。



(a) 接收端架构图

(a) Receiving end framework



(b) 系统测试图

(b) System test diagram

图 12 UESTC 的 220 GHz 系统

Fig. 12 220 GHz system by UESTC

表 7 中展示出上文提到的以及其他国内外部分较新的全固态混频通信系统。

表 7 国内外部分全固态混频通信系统

Table 7 Some solid state mixer communication systems at home and abroad

频率 (GHz)	速率 (Gbps)	距离 (m)	调制方式	工艺技术	测试系统类型	时间
120	11.1	4.2	QPSK	100 nm InP	实时	2013 ^[81]
120	10	5 800	ASK	100 nm InP	非实时	2010 ^[82]
210	10.7	0.01	OOK	40 nm CMOS	非实时	2015 ^[83]
220	15	20	OOK	50 nm InGaAs	非实时	2012 ^[87]
220	25	0.5	OOK	50 nm InGaAs	实时	2011 ^[84]
340	3	50	16QAM	CMOS	非实时	2014 ^[86]
220	3.52	200	QPSK	AlN	实时	2017 ^[85]
225~255	65	1	QPSK	130 nm SiGe	非实时	2018 ^[88]
220~260	90	1	32QAM	130 nm SiGe	非实时	2018 ^[89]
300	100	2.22	16QAM	80 nm InP HEMT	非实时	2018 ^[90]
265	80	0.03	16QAM	40 nm Si-CMOS	实时	2019 ^[91]
300	56	10	16QAM	35 nm InGaAs	非实时	2020 ^[92]
150	30	0.05	PAM4	28 nm CMOS	非实时	2020 ^[93]

对上述部分系统的频率和速率根据发展时间的先后进行标注, 如图 13 所示。

从图 13 中我们不难看出, 固态混频通信系统同样也越来越朝向高频率和高传输速率发展。结合表 7 的数据表明, 近年来固态混频通信系统的调制方式更多地趋向于选择 QAM 调制, 并且也要在传输距离上实现百米甚至千米的突破。

由于全固态混频系统不仅能满足信息传输速率更大、频率更高、距离更远的要求, 同时也能根据其采用全电子学器件的特性, 向着系统小型化、集成化进行发展。同时, 针对时分、频分、空间复用等多路信道的复用也成为未来的一个研究方向。

2.3 直接调制太赫兹通信系统

直接调制的一般原理是指发射端基带信号不需要上变频至中频后再上变频至太赫兹频段, 而是直接在太赫兹源上加载调制信号。从实现方法上分, 直接调制太赫兹通信系统分成内调制法和外调制法^[94]。前者利用在直流偏置电压上叠加数字信号, 以实现对信号源的高速开关调制实现幅度调制的功能, 由此

构成的系统需要开启速度快、直流偏置电压低且可连续开关的太赫兹振荡源。而目前共识度较高的直接调制系统属于外调制法,其泛指采用直接调制器对自由空间和片上传输的太赫兹信号直接进行幅度和相位调制,其优势体现在:可灵活搭配低、中、高功率的辐射源,根据传输距离来选择相应的太赫兹源的输出功率,对其性能要求低;系统复杂度低,无需 AD/DA 芯片,直接将数字信号加载至太赫兹载波上,有利于发展低功耗、小型化太赫兹通信系统。图 14 所示为直接调制系统的一般架构图,本振链路输出的载波信号和经过数字编码处理的基带信号通过太赫兹直接调制器进行调制后输出,接收端通过太赫兹直接检波器实现对太赫兹信号的解调。

直接调制法基于调制器类型主要分成准光型太赫兹调制器和波导型太赫兹调制器。前者基本原理是利用外加激励信号对

自由空间内传输的太赫兹波实现其频率、幅度、相位等物理参量主动控制从而实现调制^[51]。后者是对波导内传输的太赫兹导波进行调制,可以实现对片上传播的太赫兹波的幅度或相位调制,能够有效兼顾太赫兹调制器件的调制速率与调制深度,性能优良、稳定性高并且结构简单。

2011 年,美国贝尔实验室进行对应的直接调制系统研究,实现了在 625 GHz 频段下 2.5 Gbps 的传播速率^[95]。2017 年,密歇根大学使用 220 GHz 发射芯片实现的太赫兹通信系统在 217 GHz 频段上单方向最大输出功率可达到 4.6 dBm,每个通道可以实现 12.2 Gbit/s 的传输速率^[46]。电子科技大学也实现了基于 HEMT 外调制方法下的 340 GHz 太赫兹直接调制通信系统^[94]。如图 15 所示,此系统主要包括太赫兹源、太赫兹外调制器、天线和太赫兹探测器。太赫兹源产生的太赫兹波经过反射式外调制器实现信号调制,通过抛物面天线实现信号放大并进行自由空间的传输,最后被探测器接收并进行相关解调。目前,电子科技大学团队已经实现了最高 25 Gbps 速率、0.34 THz 的 OOK 通信系统。

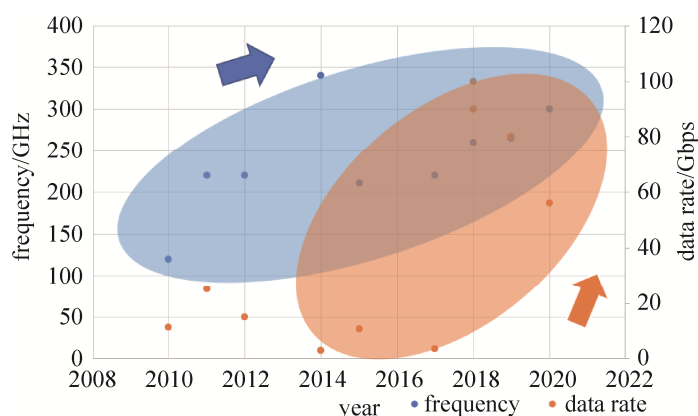
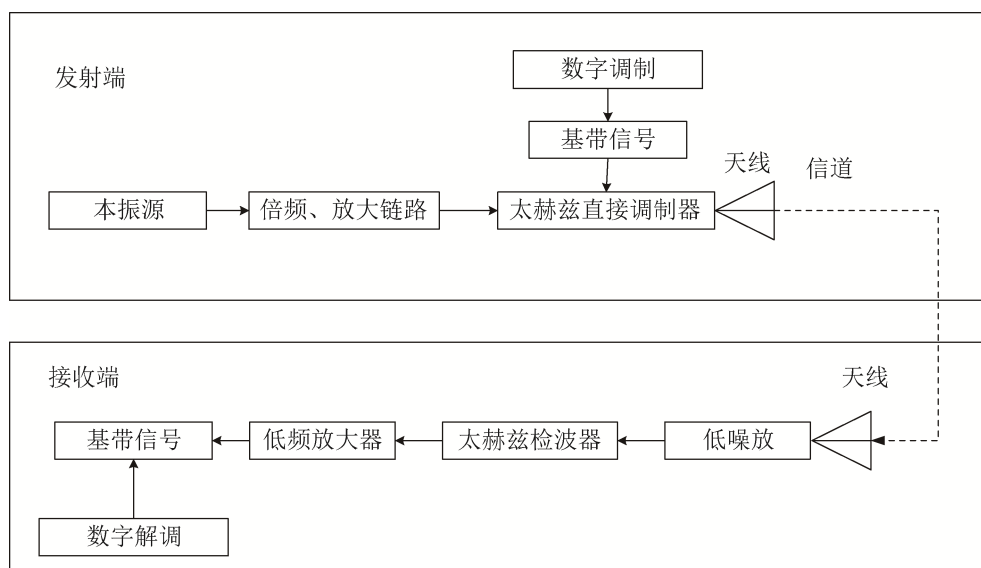
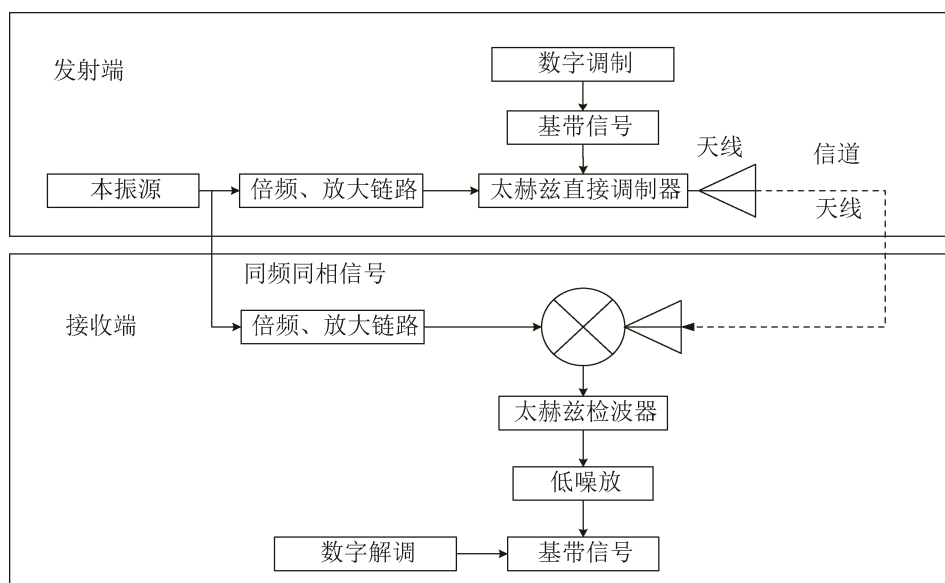


图 13 全固态混频通信系统频率和传输速率展示
Fig. 13 Frequency and data rate of all solid state mixer communication systems



(a) 直接调制通信系统直接检波接收架构图

(a) Framework of direct detection-direct modulation communication system

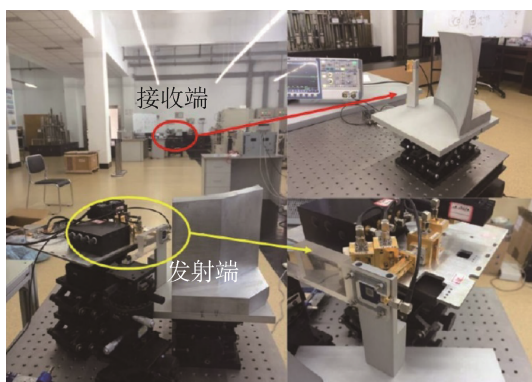


(b) 直接调制通信系统相干检波接收架构图

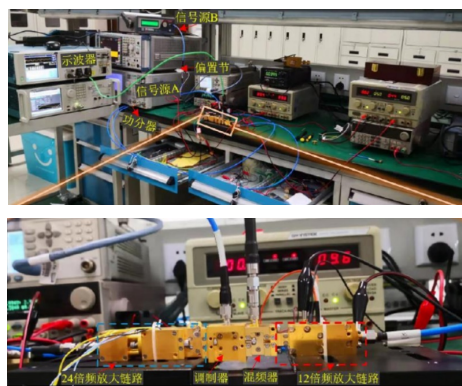
(b) Framework of coherent detection-direct modulation communication system

图 14 直接调制系统的一般架构图

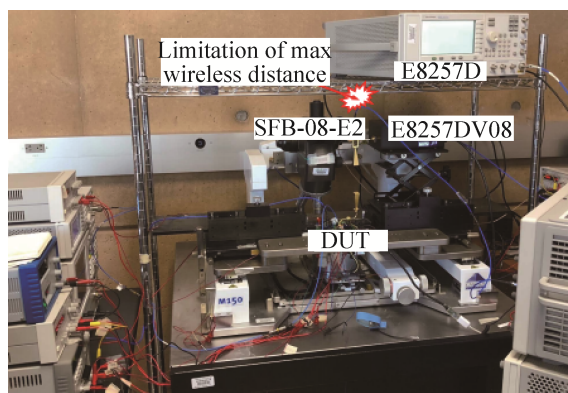
Fig. 14 General architecture of direct modulation system

(a) 340 GHz 直接调制通信系统实物图^[94]

(a) Display of 340 GHz direct modulation communication system

(b) 220 GHz 直接调制通信系统实物图^[51]

(b) Display of 220 GHz direct modulation communication system

(c) 115 GHz 直接调制通信系统实物图^[96]

(c) Display of 115 GHz direct modulation communication system

图 15 直接调制通信系统实物图

Fig. 15 Direct modulation communication system

部分国内外直接调制通信系统的数据展示见表 8。

表 8 国内外部分直接调制通信系统

Table 8 Some direct modulation communication systems at home and abroad

机构名称	中心频率 (GHz)	速率 (Gbps)	距离 (m)	调制方式	工艺技术	时间
贝尔实验室	625	2.5	<100	OOK	/	2011 ^[95]
密歇根大学	217	24.4	0.1	ASK	130 nm SiGe	2017 ^[46]
电子科技大学	340	0.1	20	/		2016 ^[94]
加州大学欧文分校	115	20	0.2	16QAM	180 nm SiGe	2019 ^[96]
电子科技大学	220	4	1	ASK	50 nm InGaAs	2020 ^[51]

近年来,利用共振隧穿二极管(RTD)、量子级联激光器的内调制方法以及采用调制器的外调制方法的通信速率快速提升,直接调制通信系统虽然在系统复杂度等方面有大幅优化,但是如果仅发展 OOK 通信,由于带宽利用率低、带宽占用宽,系统噪声会极大地限制其发展,因此高阶直接调制、多路正交或者多路编码的直接调制方法将会是未来的重要发展方向。

3 太赫兹通信技术的展望和总结

整体上讲,太赫兹波段间于微波毫米波和光波之间,既有微波毫米波和光波的很多优点,同时又有自己的特质,因此,太赫兹波在无线通信、安全检查、感通一体等多个领域具有巨大的应用前景。近年来,太赫兹凭借其尚未开发的丰富频谱资源和信息传输高速率的优势,在新一代高速无线传输技术中不断受到重视。从发展趋势看,未来的太赫兹通信技术有以下几个特点。

① 大带宽、高速率实时通信

目前,太赫兹通信技术中非实时的空口传输速率已经逐渐接近 1 Tbps,这意味着太赫兹通信具备了超高速实时通信的能力,然而从非实时系统到实时系统的发展需要高速基带技术的发展、太赫兹器件带宽的拓展,因此,未来大带宽、高速率实时通信是太赫兹的主要发展方向。

② 远距离、高效率、低功耗

太赫兹由于大气吸收和高载波频率,其在大气环境中衰减较为厉害,要扩展太赫兹通信的应用场景,通信距离的增加将是未来重要发展趋势。但是由于提高功率会带来功耗的增加,因此,提高核心器件工作效率、降低系统功耗也是重要趋势。

③ 高集成度、低复杂度

太赫兹通信要规模化推广和应用,必须要解决的就是高速率传输带来系统复杂度上升的风险,降低系统复杂度、实现高集成度是未来太赫兹通信发展的重要趋势。

④ 复用技术的使用

目前,太赫兹通信主要以单路实验系统为主,未来要进一步提高传输速率和频谱利用率,频分复用(FDM)/波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、极化复用(PWDM)等技术将被会不断地应用在太赫兹频段以获得更高的速率。

⑤ 动中通跟瞄技术的使用

虽然目前太赫兹的相关系统大部分都是点对点固定的通信,但是未来在车载、机载、卫星中的应用必须实现动中通技术,因此该技术在太赫兹通信中的应用和发展也是未来的重要发展趋势和研究方向。

未来太赫兹通信技术也将会应用到社会多个场景中,也对其应用场景进行了初步、简单的展望。

① 中近距离高速私密性通信

由于太赫兹波方向性好、波束窄,在安全保密传输上极占优势,所以非常适合用于短距高速无线数据传输,例如在人口密度大的公共场所实现无线短距离信号连接和信息传输。在 2008 年的北京奥运会期间,日本就利用太赫兹通信系统实现视频信号传输,用于高清电视的视频输出。同时,在室内方面,

NTT 将很小的基站接入单元安装在室内天花板上, 通过光纤与一个主基站连接在一起实现网络覆盖, 将太赫兹微波光子技术运用于微蜂窝的信号传输中^[61,97]。

未来的室内微、小基站等建设将是太赫兹在室内短距离高速通信的主要应用场景, 它可以实现在小范围内的热点覆盖。除此之外, 由于万物互联的物联网需求, 未来室内智能单元也可通过太赫兹实现短距离的数据传输和信息交互, 基于太赫兹信号的高清高分辨率视频传输、虚拟现实 (VR) 在家居中的运用也会成为可能。

② 基站回传

目前的通信网络主要包括核心网、承载网和以基站为主的无线接入网。而基站回传 (Backhaul) 就是实现从接入网连接到核心网的承载功能, 其要求网络满足高速率等性能指标。

由于 5G 基站以远超过 4G 基站的数量来弥补毫米波穿透性差、距离短的缺点, 结合对传输速率的要求, 采用无线回传技术可以代替光纤回传中铺设大量光纤, 解决传输成本高的问题。而随着太赫兹无线通信技术的成熟, 未来 6G 对通信速率的需求会更大, 因此, 无线回传技术能在基站信息回传到核心网的过程中发挥出重要作用。

③ 体域网和片上高速数据交互

无线体域网 (WBAN) 是包含各种分布在人体周围的传感器节点和中心节点来构成一种以人体为中心的短距离通信网络, 可以实现将人体各项体征信息 (如心跳速率等) 和外部环境信息 (如温度、湿度等) 及时传输给远程服务器的功能, 来为对象提供实时检测^[98], 如基于表面等离子体激元 (SPPs) 来检测水含量等的毫米波生物传感器^[99]。与此同时, 人体传感器应当满足体积小、易集成的特点, 因而通过 FPGA 等进行片上高速数据交互成为一种优选方法。在未来, 随着基于太赫兹频段下的生物传感器和柔性可穿戴设备的成熟, 使得以传感器、可穿戴天线等构成体域网成为可能, 其可在人体布置大量微小、灵活的传感器, 及时将大量数据传给云端服务器, 实现超宽带、实时的信息传输。

④ 空间通信

由于太赫兹波在宇宙空间传播时不会受到来自大气衰减的影响, 所以太赫兹技术在宽带卫星空间通信方向可能会起到重要的作用。例如, 通过空间通信构建起星地、卫星群的网络, 实现高速的空空、空地数据传输。未来, 可以利用太赫兹系统构建起空间信息网络^[100], 利用天基、空基、地基等平台, 实现组网互联的功能, 在星地骨干网以及卫星群骨干网间利用太赫兹波实时传输和处理海量数据, 依托万物互联的天地融合一体化物联网系统, 在导航卫星定位和高分辨率遥感、通信卫星高速率传输音频和视频数据等领域发挥重要作用。

⑤ 感通一体技术

感通一体技术是 5G 以及 6G 的潜在关键技术。太赫兹雷达成像由于高帧频、高分辨的特点, 对于地面低小慢目标的探测具有极大的优势。以目前无人智能驾驶为例, 由于在车辆行驶过程中车速较快且路况复杂多变, 对于无人控制的行驶车辆而言, 一方面要及时地收集各种路况信息, 另一方面要对信息进行迅速判断和处理, 并及时进行定位更新等。这对传感系统以及通信系统的实时性、有效性、正确性提出了极高要求。而如果通过太赫兹波构建出由车辆、路边基站、卫星等构成的天地一体化物联网, 利用太赫兹感知定位的高实时性、高精度特性和大带宽、大容量的特点, 可实现车辆的导航和精确定位信息传输更新, 也可及时处理路况的海量数据, 对突发情况采取应急措施。

4 结束语

本文围绕太赫兹通信技术, 从太赫兹通信特点、太赫兹通信用核心元器件、国内外现有通信系统成果对比以及未来可能的发展趋势等方面进行分析讨论, 阐述了太赫兹的频段优势和器件发展情况。同时, 对微波光子学太赫兹通信系统、全固态太赫兹混频通信系统和直接调制太赫兹通信系统的架构和现有成果进行分析调研, 讨论了太赫兹通信技术在高私密性通信、基站回传等场景下的潜在应用前景。以上典型应用场景只是一部分, 并不能完整地描述太赫兹通信的所有应用。随着全球信息化技术的不断发展和

未来高速通信不断演进,更多的大容量太赫兹无线通信需求将不断涌现,如何推动太赫兹通信技术发展并满足实际需求也正是我们下一步的工作目标。本综述论文也希望能与从事太赫兹通信的科研工作者共同探讨,一同推动太赫兹通信技术的发展。

参考文献

- [1] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481–486.
LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481–486.
- [2] 马静艳, 张忠皓, 李福昌, 等. 太赫兹通信关键技术与发展愿景[J]. 邮电设计技术, 2020(4): 1–5.
MA Jingyan, ZHANG Zhonghao, LI Fuchang, et al. Key technology and development vision of terahertz communication[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(4): 1–5.
- [3] 周瑶, 李毅. WRC-19 结论分析及启示[J]. 邮电设计技术, 2020(4): 26–31.
ZHOU Yao, LI Yi. WRC-19 results analysis and enlightens[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(4): 26–31.
- [4] 滕学强, 彭健. 世界各国积极推进 6G 研究进展[J]. 信息化建设, 2020, 261(6): 61–63.
- [5] FLAGSHIP 6G. 6G flagship, key drivers and research challenges for ubiquitous wireless intelligence[M/OL]. 6G Research Visions series. <https://www.6gsummit.com/original-programme/6g-white-paper-workshop/>.
- [6] 翟立君, 王妮炜, 潘沐铭, 等. 6G 无线接入关键技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(1): 1–11.
ZHAI Lijun, WANG Niwei, PAN Shuming, et al. Key technologies of 6G wireless access[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(1): 11.
- [7] 周钰哲, 孙美玉, 滕学强. 全球 6G 研发进展与发展展望[N]. 中国计算机报, 2021-07-19(8).
- [8] 延凯悦, 冯毅, 马静艳等. 太赫兹应用分析和展望[J]. 邮电设计技术, 2020(4): 11–15.
YAN Kaiyue, FENG Yi, MA Jingyan, et al. Analysis and prospect of terahertz technology application[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(4): 11–15.
- [9] MORO-MELGAR D, COJOCARI O, OPREA I. High power high efficiency 270-320 GHz source based on discrete schottky diodes[C]//2018 15th European Radar Conference (EuRAD). DOI:10.23919/EuRAD.2018.8546616.
- [10] SILES J V, SCHLECHT E, LIN R, et al. High-efficiency planar Schottky diode based submillimeter-wave frequency multipliers optimized for high-power operation[C]//2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). DOI:10.1109/IRMMW-THz.2015.7327677.
- [11] SILES J V, COOPER K B, LEE C, et al. A new generation of room-temperature frequency-multiplied sources with up to $10\times$ higher output power in the 160-GHz–1.6-THz range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(6): 596–604. DOI:10.1109/TTHz.2018.2876620.
- [12] LIANG S, SONG X, ZHANG L, et al. A 177–183 GHz high-power GaN-Based frequency doubler with over 200 mW output power[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(5): 669–672. DOI:10.1109/LED.2020.2981939.
- [13] 石向阳, 刘杰, 蒋均, 等. 基于 CSMRC 结构和容性肖特基二极管的 220 GHz 三倍频器[J]. 强激光与离子束, 2018, 30(9): 44–49.
SHI Xiangyang, LIU Jie, JIANG Jun, et al. 220 GHz tripler based on compact suspended microstrip resonator cell filter structure and Schottky varactors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(9): 44–49.
- [14] 李理, 陈鹏, 田遥岭, 等. 410 GHz–510 GHz 宽带倍频器研究[C]//2019 年全国微波毫米波会议, 2019: 692–695.
- [15] 杨大宝, 邢东, 梁士雄, 等. 单片集成 430 GHz 三倍频器的设计及测试[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 318–323.
YANG Dabao, XING Dong, LIANG Shixiong, et al. Design and test of monolithically integrated 430 GHz frequency tripler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 318–323.
- [16] 吕肖林. 0.3 THz 单片集成倍频器[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [17] LIU Y, ZHANG B, FENG Y, et al. Development of 340-GHz transceiver front end based on GaAs monolithic integration technology for THz active imaging array[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7924.
- [18] WANG C, HE Y, LU B, et al. Robust sub-harmonic mixer at 340 GHz using intrinsic resonances of hammer-head filter and improved diode model[J]. Infrared Milli Terahz Waves, 2017, 38: 1397–1415. <https://doi.org/10.1007/s10762-017-0436-4>.

- [19] 宋缘. 220 GHz 三次谐波混频器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [20] 刘戈, 张波, 张立森, 等. 基于二极管 3D 精确模型的 0.42 THz 分谐波混频器[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(3): 338–343.
LIU Ge, ZHANG Bo, ZHANG Lisen, et al. 0.42 THz subharmonic mixer based on 3D precisely modeled diode[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 338–343.
- [21] 钱志宇, 梅亮, 钱骏. 330 GHz 高性能二次谐波混频器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(01): 24–28.
QIAN Zhiyu, MEI Liang, QIAN Jun. Design of 330 GHz high-performance sub-harmonic mixer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(1): 24–28.
- [22] JI, ZHANG Y, MENG L, et al. A novel 183 GHz solid-state sub-harmonic mixer[J]. Electronics, 2020, 9: 186. DOI: 10.3390/electronics9010186.
- [23] 纪广玉. 太赫兹固态混频技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
- [24] JI D, ZHANG B, WANG J, et al. Analysis of welding pad for terahertz hybrid integrated mixer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 22506–22514. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968080.
- [25] ZHANG B, ZHANG Y, PAN L, et al. A 560 GHz sub-harmonic mixer using half-global design method[J]. Electronics, 2021, 10(3): 234.
- [26] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 17–21.
WEI Kejun, ZHAO Yang, XU Xiaoyan. Analysis of 6G vision and potential key technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 17–21.
- [27] 朱伏生, 赖峥嵘, 刘芳. 6G 无线技术趋势分析[J]. 信息通信技术与政策, 2020, 4(12): 1–6.
ZHU Fusheng, LAI Zhengrong, LIU Fang. Trend analysis of 6G wireless technology[J]. Telecommunications Network Technology, 2020, 4(12): 1–6.
- [28] MEI X, YOSHIDA W, LANGE M, et al. First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process[J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(4): 327–329. DOI:10.1109/LED.2015.2407193.
- [29] LI O-P, ZHANG Y, XU R-M, et al. A G-band terahertz monolithic integrated amplifier in 0.5- μm InP double heterojunction bipolar transistor technology[J/OL]. Chinese Physics B, 2016, 25(5): 58401. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/25/5/058401>. DOI:10.1088/1674-1056/25/5/058401.
- [30] GRIFFITH Z, URTEAGA M, ROWELL P. 180–265 GHz, 17–24 dBm output power broadband, high-gain power amplifiers in InP HBT[C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). DOI:10.1109/MWSYM.2017.8058751.
- [31] 李骁, 徐锐敏. 太赫兹 InP DHBT 收发芯片关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [32] YAN S, WEI C, YAN L H, et al. A 300 GHz monolithic integrated amplifier in 0.5- μm InP double heterojunction bipolar transistor technology[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563862.
- [33] JOHN L, TESSMANN A, LEUTHER A, et al. Investigation of compact power amplifier cells at THz frequencies using InGaAs mHEMT technology[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). DOI: 10.1109/MWSYM.2019.8701076.
- [34] 孙岩, 程伟, 陆海燕, 等. 220 GHz InP DHBT 单片集成功率放大器[J]. 固体电子学研究进展, 2018(5): 389.
SUN Yan, CHENG Wei, LU Haiyan, et al. A 220 GHz InP DHBT power amplifier MMIC[J]. Research & Progress of SSE, 2018, 38(5): 389.
- [35] VARONEN M, LARKOSKI P, FUNG A, et al. 160–270-GHz InP HEMT MMIC low-noise amplifiers[C]//2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). DOI:10.1109/CSICS.2012.6340058.
- [36] KÄRKKÄINEN M, KANTANEN M, CAUJOLLE-BERT S, et al. MHEMT SiGe -band low-noise amplifiers[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(4): 459–468. DOI:10.1109/TTHZ.2014.2327383.
- [37] WATSON P, MATTAMANA A, GILBERT R, et al. A wide-bandwidth W-band LNA in InP/Si BiCMOS technology[C]//2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014). DOI: 10.1109/MWSYM.2014.6848249.
- [38] VARONEN M, SAMOSKA L, FUNG A, et al. LNA modules for the WR4 (170–260 GHz) frequency range[C]//2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014). DOI: 10.1109/MWSYM.2014.6848291.
- [39] KIM D, KIM D, RIEH J. A D-band CMOS amplifier with a new dual-frequency interstage matching technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(5): 1580–1588. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2655508.

- [40] 林勇, 吴洪江, 方园, 等. 一款 220 GHz 低噪声放大器模块的设计和实现[C]//2018 年全国微波毫米波会议论文集(下册).
- [41] 毛燕飞, 鄂世举, KLAUS S, et al. 220 GHz 低噪声放大器研究[J]. 红外, 2019, 40(8): 24-30.
MAO Yanfei, E Shiju, KLAUS S, et al. Research on 220 GHz low noise amplifiers[J]. Infrared, 2019, 40(8): 24-30.
- [42] SAVINOV V, FEDOTOV V A, ANLAGE S M, et al. Modulating Sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(24): 243904. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.243904.
- [43] LI C, WU J, JIANG S, et al. Electrical dynamic modulation of THz radiation based on superconducting metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111: 92601. DOI: 10.1063/1.4997097.
- [44] ZHEN Z, WANG S, YUE Y, et al. High performance metamaterials-high electron mobility transistors integrated terahertz modulator[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17832.
- [45] SINGH P K, SONKUSALE S. High speed terahertz modulator on the chip based on tunable terahertz slot waveguide[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40933.
- [46] JIANG C, CATHELIN A, AFSHARI E. A high-speed efficient 220-GHz spatial-orthogonal ASK transmitter in 130-nm SiGe BiCMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(9): 2321-2334.
- [47] CAI H, CHEN S, ZOU C, et al. Multifunctional hybrid metasurfaces for dynamic tuning of terahertz waves[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6: 1800257. DOI:10.1002/adom.201800257.
- [48] CHEN Z, CHEN X, LI T, et al. Graphene controlled Brewster angle device for ultra broadband terahertz modulation[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4909. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07367-8>.
- [49] ZHAO Y, WANG L, ZHANG Y, et al. High-speed efficient terahertz modulation based on tunable collective-individual state conversion within an active 3 nm two-dimensional electron gas metasurface[J]. Nano Letters, 2019, 19(11): 7588-7597. DOI:10.1021/acs.nanolett.9b01273.
- [50] SHEN X, CUI T J. Photoexcited broadband redshift switch and strength modulation of terahertz metamaterial absorber[J]. Journal of Optics, 2012, 14(11): 114012.
- [51] 张亭. 片上集成太赫兹电控高速调制器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [52] 侯旭. 片上周期型太赫兹调制器件的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [53] 姜航, 姚远. 高速长距离太赫兹通信系统研究现状与难点综述[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 69-72.
JIANG Hang, YAO Yuan. An overview on research status and difficulties of high-speed long-distance terahertz communication system[J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(6): 69-72.
- [54] XU J, CHEN Z N, QING X. 270-GHz LTCC-integrated high gain cavity-backed fresnel zone plate lens antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1679-1687. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232261.
- [55] INOUE M, HODONO M, HORIGUCHI S. Ultra-broadband terahertz receivers using polymer substrate[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(2): 225-231. DOI: 10.1109/TTHZ.2013.2296994.
- [56] CHAHAT N, RECK T J, JUNG-KUBIAK C. 1.9-THz multiflare angle horn optimization for space instruments[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6): 914-921. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2487781.
- [57] DENG X, LI Y, WU W, et al. 340-GHz siw cavity-backed magnetic rectangular slot loop antennas and arrays in silicon technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5272-5279. DOI: 10.1109/TAP.2015.2490248.
- [58] GONZALEZ A, KANEKO K, ASAYAMA S. 1.25-1.57 THz dual-polarization receiver optics based on corrugated horns[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(3): 321-328. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2813088.
- [59] DAVOUDABADIFARAHANI H, GHALAMKARI B. High efficiency miniaturized microstrip patch antenna for wideband terahertz communications applications[J/OL]. Optik, 2019, 194: 163118. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402619310095>. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163118.
- [60] 李海鸥, 李思敏, 陈明, 等. 微波光子技术的研究进展[J]. 光通信技术, 2011, 8: 24-28.
LI Haiou, LI Simin, CHEN Ming, et al. Research progresses on microwave photonics technologies[J]. Optical Communication Technology, 2011, 8: 24-28.
- [61] STÖHR A, BABIEL S, CANNARD P J, et al. Millimeter-wave photonic components for broadband wireless systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3071-3082.
- [62] DUCOURNAU G, YOSHIMIZU Y, HISATAKE S, et al. Coherent THz communication at 200 GHz using a frequency

- comb, UTC-PD and electronic detection[J]. Electronics letters, 2014, 50(5): 386–388.
- [63] LIU K, JIA S, WANG S, et al. 100 Gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350-GHz band with extended reach[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(11): 1064–1067.
- [64] LI X, YU J, ZHAO L, et al. 132-Gb/s photonics-aided single-carrier wireless terahertz-wave signal transmission at 450 GHz enabled by 64 QAM modulation and probabilistic shaping[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2019: M4F-4.
- [65] JIA S, PANG X, OZOLINS O, et al. 0.4 THz photonic-wireless link with 106 Gb/s single channel bitrate[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 610–616.
- [66] JIA S, LO M C, ZHANG L. Integrated dual-DFB laser for 408 GHz carrier generation enabling 131 Gbit/s wireless transmission over 10.7 meters[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2019: Th1C-2.
- [67] HIRATA A, KOSUGI T, TAKAHASHI H, et al. 120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2006, 54(5): 1937–1944.
- [68] ITO H, NAKAJIMA F, FURUTA T, et al. Continuous THz-wave generation using antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiodes[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(7). DOI:10.1088/0268-1242/20/7/008.
- [69] CARPINTERO G, HISATAKE S, DE FELIPE D, et al. Wireless data transmission at terahertz carrier waves generated from a hybrid InP-polymer dual tunable DBR laser photonic integrated circuit[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 1–7.
- [70] MOON S R, SUNG M, LEE J K, et al. Cost-effective photonics-based THz wireless transmission using PAM-N signals in the 0.3 THz band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(2): 357–362.
- [71] UMMETHALA S, HARTER T, KOEHNLE K, et al. THz-to-optical conversion in wireless communications using an ultra-broadband plasmonic modulator[J]. Nature Photonics, 2019, 13(8): 519–524.
- [72] NAGATSUMA T, Horiguchi S, MINAMIKATA Y, et al. Terahertz wireless communications based on photonics technologies[J]. Optics express, 2013, 21(20): 23736–23747.
- [73] NAGATSUMA T, FUJITA Y, YASUDA Y, et al. Real-time 100-Gbit/s QPSK transmission using photonics-based 300-GHz-band wireless link[C]//2016 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2016: 27–30.
- [74] YONENAGA K, HORIKOSHI K, OKAMOTO S, et al. Field demonstration of modulation format adaptation based on pilot-aided OSNR estimation using 400 Gbps/ch real-time DSP[C]//2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS). IEEE, 2016: 1–3.
- [75] LACOMBE E, BELEM-GONCALVES C, LUXEY C, et al. 10-Gb/s indoor THz communications using industrial Si photonics technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(4): 362–364.
- [76] LIU K, JIA S, WANG S, et al. Enhanced accessibility of 350 GHz 100 Gbit/s 16-QAM photonic wireless link[C]//2018 11th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). IEEE, 2018: 1–3.
- [77] HARTER T, UMMETHALA S, BLAICHER M, et al. Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver[J]. Optica, 2019, 6(8): 1063–1070.
- [78] JIA S, ZHANG L, WANG S, et al. 2×300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(17): 4715–4721.
- [79] UEMURA Y, KAWAMOTO Y, SHIBATA N, et al. 600-GHz-band heterodyne receiver system using photonic techniques[C]//2020 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2020: 256–259.
- [80] WANG S, LU Z, LI W, et al. 26.8-m THz wireless transmission of probabilistic shaping 16-QAM-OFDM signals[J]. APL Photonics, 2020, 5(5): 56105.
- [81] TAKAHASHI H, KOSUGI T, HIRATA A, et al. 120-GHz-band fully integrated wireless link using QSPK for realtime 10-Gbit/s transmission[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(12): 4745–4753.
- [82] HIRATA A, KOSUGI T, TAKAHASHI H, et al. 5.8-km 10-Gbps data transmission over a 120-GHz-band wireless link[C]//2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems. IEEE, 2010: 1–4.
- [83] MOGHADAMI S, HAJILOU F, AGRAWAL P, et al. A 210 GHz fully-integrated OOK transceiver for short-range wireless chip-to-chip communication in 40 nm CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(5): 737–741.
- [84] KALLFASS I, ANTES J, SCHNEIDER T, et al. All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2): 477–487.

- [85] 陈哲. 固态太赫兹高速无线通信技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [86] WANG C, LU B, LIN C, et al. 0.34-THz wireless link based on high-order modulation for future wireless local area network applications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(1): 75–85.
- [87] ANTES J, KOENIG S, LEUTHER A, et al. 220 GHz wireless data transmission experiments up to 30 Gbit/s[C]//2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2012: 1–3.
- [88] RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ P, GRZYB J, SARMAH N, et al. A 65 Gbps QPSK one meter wireless link operating at a 225–255 GHz tunable carrier in a SiGe HBT technology[C]//2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), IEEE, 2018: 146–149.
- [89] RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ P, GRZYB J, HEINEMANN B, et al. Performance evaluation of a 32-QAM 1-meter wireless link operating at 220–260 GHz with a data-rate of 90 Gbps[C]//2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE, 2018: 723–725.
- [90] HAMADA H, FUJIMURA T, ABDO I, et al. 300-GHz. 100-Gb/s InP-HEMT wireless transceiver using a 300-GHz fundamental mixer[C]//2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS. IEEE, 2018: 1480–1483.
- [91] LEE S, HARA S, YOSHIDA T, et al. An 80-Gb/s 300-GHz-band single-chip CMOS transceiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(12): 3577–3588.
- [92] DAN I, DUCOURNAU G, HISATAKE S, et al. A terahertz wireless communication link using a superheterodyne approach[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 10(1): 32–43.
- [93] KIM Y, HU B, HUANG R, et al. 150-GHz CMOS TX/RX with digitally predistorted PAM-4 modulation for terahertz contactless/plastic waveguide communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(4): 370–382.
- [94] 乔绅. 新型 HEMT 太赫兹动态器件的基础研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [95] MOELLER L, FEDERICI J, SU K. 2.5 Gbit/s duobinary signalling with narrow bandwidth 0.625 terahertz source[J]. Electronics letters, 2011, 47(15): 856–858.
- [96] WANG H, MOHAMMADNEZHAD H, HEYDARI P. Analysis and design of high-order QAM direct-modulation transmitter for high-speed point-to-point mm-wave wireless links[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(11): 3161–3179.
- [97] HORIUCHI Y. ROF application to 3G mobile systems in offices and outdoors[C]//2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics. IEEE, 2005: 3.
- [98] 欧阳峰, 张宇. 无线体域网研究进展综述[J]. 电子科技, 2016, 29(12): 173–179.
OUYANG Feng, ZHANG Yu. Research progress of wireless body area network[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(12): 173–179.
- [99] 张宝. 基于表面等离子体激元的微波/毫米波生物传感器[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [100] 张更新, 丁晓进, 曲至诚. 天地一体化物联网体系架构及干扰分析研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 22–33.
ZHANG Gengxin, DING Xiaojin, QU Zhicheng. Research on space-based integrated internet of things architecture and interference analysis[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 22–33.

[作者简介]

- 雷于露 1999 年生, 在读本科生, 物理学院电子信息科学与技术专业。
- 曹浩一 2000 年生, 在读本科生, 物理学院电子信息科学与技术专业。
- 曾泓鑫 1990 年生, 博士, 主要研究方向为太赫兹通信系统和超构结构
- 董亚洲 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为射频前端电路。
- 冯 伟 1997 年生, 硕士, 主要研究方向为毫米波及太赫兹混频技术。
- 丁科森 1995 年生, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹科学技术与应用。
- 郝晓林 1996 年生, 硕士, 主要研究方向为太赫兹科学技术。
- 王 正 1999 年生, 在读本科生, 主要研究方向为太赫兹系统架构。
- 张雅鑫 1981 年生, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹科学技术。