



中国联通太赫兹通信技术白皮书

中国联通
2020 年 6 月

目录

1 概述.....	1
1.1 太赫兹通信技术发展需求.....	1
1.2 白皮书状态.....	2
2 太赫兹通信技术特点.....	3
2.1 太赫兹频谱特性.....	3
2.2 超大带宽超高速率通信能力.....	4
2.3 高传播损耗.....	4
2.4 超大规模天线技术.....	5
2.5 太赫兹通感技术融合.....	6
3 太赫兹通信应用场景.....	6
3.1 地面无线通信.....	7
3.2 空间通信.....	10
3.3 微小尺度通信.....	11
4 太赫兹通信关键技术及挑战.....	13
4.1 太赫兹通信关键器件及模块.....	13
4.2 太赫兹传播特性及信道建模.....	16
4.3 太赫兹通信空口技术.....	20
5 太赫兹通信产业进展及发展建议.....	25
5.1 标准化进展.....	25
5.2 国际各区域产业进展.....	27
5.3 国内产业进展.....	31
5.4 产业发展建议.....	35
6 中国联通太赫兹通信愿景与推进计划.....	37
6.1 愿景目标.....	37
6.2 推进计划及工作进展.....	37
7 总结与展望.....	40
参考文献.....	41

1 概述

1.1 太赫兹通信技术发展需求

从上世纪 80 年代，移动通信业经历了模拟语音业务应用的 1G 时代，新增短信应用的 2G 时代，到多媒体业务应用的 3G 时代，再到移动互联网应用的 4G 时代，移动通信呈现出“十年一变革”的发展规律。2019 年随着全球 5G 商用化进程加快，国际各区域和研究组织已纷纷开启下一代通信技术研究。2019 年 3 月，芬兰奥卢大学邀请多个国家的通信专家召开了全球首届 6G 峰会，共同探讨下一代通信技术驱动因素、研究挑战和未来愿景，并在 2019 年 9 月发布了全球首份 6G 白皮书^[1]。2019 年 11 月 3 日，我国科技部会同发展改革委、教育部、工信部、中科院、自然科学基金委在北京组织召开 6G 技术研发工作启动会，成立国家 6G 技术研发推进工作组和总体专家组，标志着我国 6G 技术研发工作正式启动。

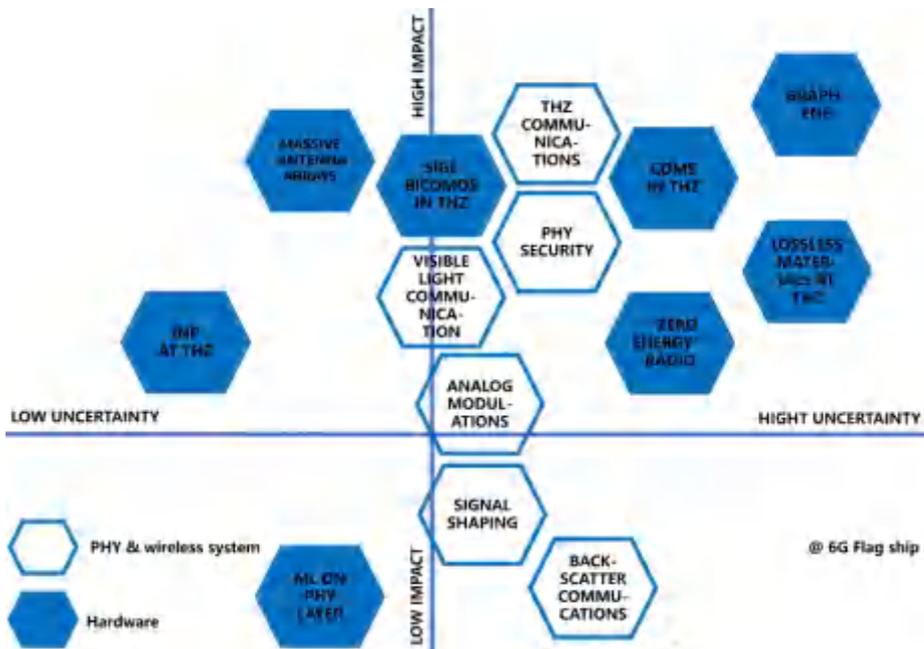


图 1.1 未来可能的无线新技术(硬件和物理层)^[1]

6G 研究的整体技术路目前线尚不明确，学术界对于未来 6G 的底层候选技术、网络特征和目标愿景都处于热烈的自由探讨中，涌现出很多颠覆性通信架构和技术概念。如图 1.1 所示为全球首份 6G 白皮书报告中对未来众多 6G 候选技术应用

潜力和技术影响力的分析和预估。可以看到，14个6G潜在无线技术方向中，有6个与太赫兹相关，分别包括太赫兹通信相关的关键器件材料工艺（磷化铟、锗硅CMOS、COMS、石墨烯、无损太赫兹材料等）和无线物理层设计等。该份白皮书报告同时认为，“太赫兹关键器件会是未来6G愿景实现的关键技术与挑战^[1]”。

太赫兹波段以其丰富的频谱资源和独有特性，受到学术界的热烈关注，也受到欧、美、日等国家区域和组织的高度重视，并获得了国际电信联盟（ITU）的大力支持，成为极具潜力的6G关键候选频谱技术。基于通信网络技术平滑演进的考虑，太赫兹通信也是目前产业界热议和关注较多的技术方向，开展太赫兹通信技术研究既符合网络技术的演进需求，也具备较高可行性。

中国联通也已启动对太赫兹通信技术和产业推动工作，并基于前期研究进展形成本白皮书内容，对太赫兹通信的产业现状、技术特点、应用场景及关键技术挑战等进行了初步探讨，并提出了中国联通对太赫兹通信技术发展方向初步规划。中国联通将以应用需求为牵引，持续开展太赫兹通信关键技术研究、太赫兹通信技术标准化推进和产业发展推动工作，发布本白皮书的目的是向产业界释放积极信号，吸引产业界各合作伙伴一起，共同促进和推动太赫兹通信技术产业发展。

1.2 白皮书状态

本白皮书1.0版本初步探讨了中国联通对于太赫兹通信技术特点、应用场景及关键技术挑战等内容的观点，提出了中国联通对太赫兹通信技术产业的发展建议及后续推进计划，部分内容尚需进一步深入研究探讨。希望此版本白皮书的发布能够引起产业界的关注，吸引更多的行业伙伴与中国联通一起合作开展关键技术研究、标准化推动以及试点应用等方面的工作，共同推动太赫兹通信产业链发展。随着研究的不断深入，太赫兹通信技术路线和方案会更加明晰，新的研究内容和成果会不断体现到后续版本中，欢迎行业伙伴提出修改意见和建议。

2 太赫兹通信技术特点

2.1 太赫兹频谱特性

太赫兹 (Terahertz, THz) 波指位于 0.1THz-10THz 频率之间频段的电磁波, 如图 2.1 所示。

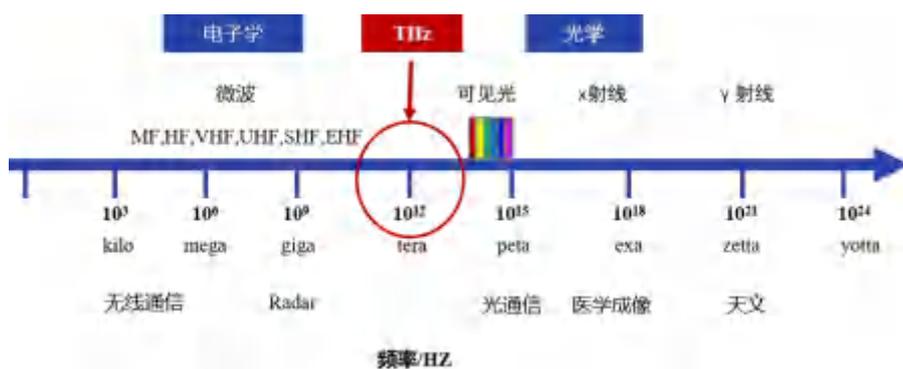


图 2.1 太赫兹频谱频段

太赫兹波的波长范围是 $30\ \mu\text{m}$ - 3mm , 在整个电磁波谱中位于微波和红外波频段之间。由于在电磁波谱的特殊位置, 太赫兹波既具有微波频段的穿透性和吸收性, 又具有光谱分辨特性。下面是太赫兹波的一些特性及应用领域^[2]:

- ◇ 穿透性, 太赫兹辐射对塑料、布料、电介质等材料, 沙尘等均具有很强的穿透性。这一特点使得太赫兹波可以用于质量或安全检测等领域。
- ◇ 低能性, 与 X 射线等高频段电磁波相比, 太赫兹波的光子能量量级仅为毫电子伏特, 为 X 射线光子能量的的百分之一不到, 对大部分的生物细胞和探测体都不会造成伤害, 应用太赫兹技术制造的医疗诊断设备可以大大降低电磁波照射造成的人体伤害, 实现无损检测。
- ◇ 瞬态性, 与微波频段相比, 太赫兹波频率较高, 太赫兹激光器的脉冲为皮秒量级, 能够达到很高的时间分辨率, 可以用于生物样本等对时间分辨率要求较高的成像检测和医学研究中。
- ◇ “指纹”谱, 太赫兹的频谱很宽, 能够覆盖蛋白质和毒品等大分子的转动振

荡频率，这些大分子都在太赫兹波段具有很强的吸收和谐振，构成了相应的太赫兹“指纹”谱，可以用于实现分子级别的物质检测与鉴别。

- ✧ 宽带性，太赫兹频段的频谱资源很丰富，可用频谱带宽比微波高几个数量级。太赫兹频段电磁波在外层空间可以进行无损传输，用较小发射功率就实现远距离通信，还可以避免地球辐射噪声的影响，穿透通信黑障。因此太赫兹可应用于空间通信和无线宽带通信。

太赫兹波的上述特性使其在检测、生物医学、军事探测与保密通信，以及空间卫星通信等领域都获得了重要应用。太赫兹波具有丰富的频段资源可供利用，使其可用于超宽带无线通信，并且成为 B5G/6G 的重要潜在技术，下面将探讨分析太赫兹通信的技术特点。

2.2 超大带宽超高速率通信能力

现阶段 5G 高频毫米波支持的最大工作带宽为 800MHz，目前业界的实验测试下行峰值速率最高在 10Gbps 左右。超高通信速率的实现离不开超大工作带宽的支持，与已经广泛应用的微波频段通信相比，太赫兹频段具有非常丰富的频率资源，可利用的工作带宽可能高达几十 GHz。目前国内外已实现的太赫兹通信原型验证系统的工作带宽一般都大于 2GHz，远远大于现阶段 5G 通信系统的工作带宽。

超大带宽资源的利用使得太赫兹通信系统可以支持超高的通信速率，目前工作频段在 300GHz 以下太赫兹通信支持的最高速率可达 100Gbps，预计未来 B5G/6G 应用时太赫兹通信速率可能达到太比特量级，而支持超大工作带宽和超高通信速率将会是太赫兹通信最显著的技术特征和性能优势。

2.3 高传播损耗

太赫兹频段的频率比毫米波更高，依据电磁波的传播特性，这个频段的传播与穿透损耗也比较大。根据 Friis 自由空间损耗计算公式^[3]，如下式所示：

$$L_{FSdB/km} = 32.4 + 20 \log f_{MHz} + 20 \log d_{km} - G_{Tx dBi} - G_{Rx dBi} \quad (2.1)$$

其中, $L_{FSdB/km}$ 表示路径损耗, f_{MHz} 表示电磁波频率, d_{km} 表示传播距离, $G_{Tx dBi}$ 表示发射增益, $G_{Rx dBi}$ 表示接收增益。根据式(2.1), 可以得到在自由空间传播时, 1THz 以下太赫兹频段电磁波相对于 26GHz 毫米波频段的粗估路损差, 如图 2.2 所示。

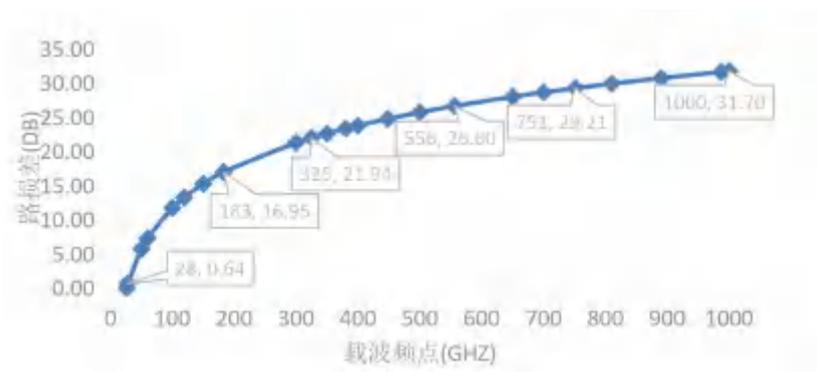


图 2.2 太赫兹频段不同频点与毫米波 26GHz 频点自由空间传播路损差

由图 2.2 可以看到不考虑水分子和氧气吸收带的情况下, 自由空间传播时 1THz 以下的太赫兹频段相对 26GHz 毫米波的路径损耗增加了 10-35dB。因此在发射和接收增益受限的情景下, 太赫兹频段的通信系统覆盖距离会大大缩短, 并且穿透和绕射能力较差, 所以更适合用于室内短距高速通信, 需要其他覆盖增强技术, 比如超大规模阵列天线技术来满足室外远距离覆盖要求。

2.4 超大规模天线技术

大规模天线阵列的应用是 5G 通信的一个技术特点, 尤其是在高频段毫米波的应用带来了覆盖和容量增强、用户分集等众多应用优势。由于太赫兹频段的路径传播损耗相比于毫米波更大, 未来太赫兹通信系统也极有可能采用超大规模天线技术来实现室外或较远距离的增强覆盖。全球首个 6G 白皮书预估, 随着新型材料和工艺技术的发展和突破, 未来 B5G/6G 应用时, 工作频点在 250GHz 时, 4 平方厘米的面积可能安装超过 1000 个天线^[1], 太赫兹通信系统未来有望实现超大规模天线阵列。

尽管目前的太赫兹天线技术尚不支持实现小尺寸集成化的大规模太赫兹天线阵列, 但可以预见的是, 随着太赫兹相关技术的不断突破和进展, 未来 6G 应用阶段, 太赫兹天线技术有望支持大规模阵列天线方案, 用以实现太赫兹通信增

强覆盖。超大规模天线技术的应用除了增强通信覆盖距离外，还可以用于支持超窄波束赋形，超高角度分辨率和超高定位精度性能，未来 6G 通信的室内定位精度可能达到厘米量级^[1]。

2.5 太赫兹通感技术融合

随着波长变短和可用带宽的增加，融合了太赫兹通信、高精度定位，3D 成像及感知等技术的太赫兹通信和先进感知系统有可能在未来实现^[1]，成为未来通信的技术特点。目前太赫兹通感技术的融合应用研究面临多方面待探讨问题，包括应用场景，物理硬件的整体设计，通信和多种感知信息处理技术的融合，通感系统的能耗问题等等，都还缺少成型的技术路线和方案。有研究者认为，基于硬件功能需求，超高速率、低成本的通信和感知系统应该在“前所未有的尺度上进行整体研究^[4]”。未来“零能耗”等关键技术的突破有可能使超高速率、超低成本太赫兹通感技术融合成为未来通信的技术特点。

综上，太赫兹通信可支持超大带宽超高速率通信传输，但太赫兹通信频段的路径损耗较大，且穿透和绕射能力较差，易被建筑物和物体遮挡。因此太赫兹通信具有大带宽、超高速、短距、安全等应用特点，可用于超宽带无线接入、安全保密通信等应用场景，另外也有可能与高精度定位和 3D 成像感知等应用实现技术融合，应用于多种未来通信场景。根据太赫兹通信的上述技术特点，下节将讨论未来太赫兹通信适用的一些通信场景。

3 太赫兹通信应用场景

3.1 地面无线通信

3.1.1 点对点无线通信

◇ 无线回传

太赫兹无线收发设备可以用于代替光纤或电缆实现基站数据的高速回传，节省光纤部署成本，在高山、沙漠、河流等无法部署光纤的区域应用太赫兹无线链路实现高速数据传输，作为光纤的延伸。目前国内外已有的太赫兹原型通信系统已具备数据无线传输能力，未来需要发展的技术重点是相关功能设备的低功耗、低成本和小型化。



图 3.1 无线回传应用

◇ 固定无线接入 (FWA)

FWA (Fixed Wireless Access, 固定无线接入) 是在 5G 已实现商用的一种通信场景，目前较多应用毫米波技术实现。由于太赫兹通信可以支持的带宽和速率会远远大于毫米波频段，未来可应用于 FWA 场景，用于满足 6G 通信能力需求。

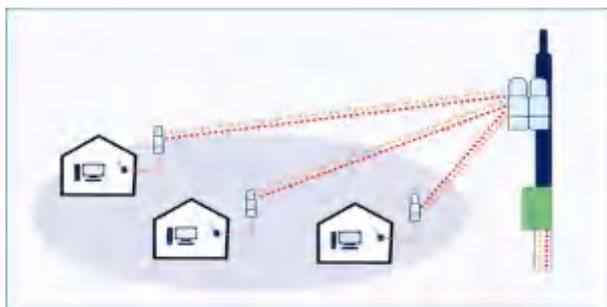


图 3.2 固定无线接入

◇ 无线数据中心

随着 ICT 技术的不断发展，云服务应用的需求不断增加，对数据中心的应用需求也快速增长。传统的数据中心架构基于线缆连接，海量线缆的空间占用和维护成本较高，对于数据中心的散热成本和服务器性能都有一定影响^[5]。太赫兹以其超高通信速率特点，被认为可能广泛应用于无线数据中心，用以降低数据中心空间成本、线缆维护成本和功耗，有较多相关研究成果发表^[6-9]。



图 3.3 无线数据中心

◇ 安全接入通信

太赫兹通信路损高，传播距离短，指向性好的特点，可用于设备之间的安全接入、超高速安全下载及安全支付等安全通信场景。该类型应用场景已在 IEEE Std 802.15.3d-2017 标准中定义^[10]，技术标准化成熟度较高。



图 3.4 安全支付

点对点固定无线通信类应用场景中，太赫兹通信收发设备无需使用阵列天线用以支持移动通信能力，且除光纤替代场景外，多为室内短距通信，数据无线传输功能已基本具备，相关应用包括应用频谱、太赫兹传播特性和信道模型等相关技术的标准化成熟度也相对较高，未来有望较早实现相关场景的试点与落地应用。

3.1.2 无线移动通信

◇ 热点地区超宽带覆盖

随着无线通信技术的发展，未来 6G 时代的通信业务应用，例如全息通信，高质量视频在线会议，增强现实/虚拟现实，3D 游戏等，对数据速率、时延和连接数等网络 KPI 的需求与 5G 相比可能呈现数量级增长。6G 未来应用愿景的特点包括无处不在的泛在链接，意味着家庭、办公室、餐厅、商场、机场、体育场、旅游景点等多种人类生活、工作、娱乐和社交场所都会有超高的移动通信能力需求。太赫兹通信数据率高的特点，使其将来可用于为热点地区提供超高速网络覆盖，作为宏蜂窝网络的补充，提供小区超宽带无线通信。由于太赫兹波路损较高，仍需要使用大规模天线阵列用以支持移动通信能力，并且需要适配的太赫兹通信空口技术用以实现超宽带高速率移动通信功能。



图 3.5 热点地区超宽带覆盖

未来实现网络部署需要以太赫兹通信系统中，包括关键器件/芯片/组件，室外信道建模、大规模天线阵列等各项关键技术标准化成型和产业化成熟为前提。从目前国内外太赫兹通信技术能力来看，该类场景应用面临的关键技术挑战和问题瓶颈较多，距离应用落地还有一定距离。

◇ 无线局域网/无线个域网

随着无线通信技术的发展，无线局域网（Wireless Local Area Networks, WLAN）与移动通信网络一样，也会面临现有系统能力无法满足未来 6G 通信业务需求的问题。考虑到太赫兹设备对于高速、宽带的支持能力，未来具备小型化、低功耗和低成本特点的太赫兹设备可考虑用以实现太赫兹 WLAN^[10]，满足未来 6G

通信业务的需求。



图 3.6 太赫兹无线局域网/无线个域网

太赫兹频段通信可以实现近距离设备之间的高速链路,同样可以应用在太赫兹无线个人局域网(Wireless Personal Area Network,WPAN)场景中^[10],用于个人电子设备,如个人电脑、手持终端或可穿戴终端等设备之间的无线链接,实现超高速数据互传。

3.2 空间通信

太赫兹频段电磁波在外层空间可以进行无损传输,用较小发射功率就实现远距离通信,还可以避免地球辐射噪声的影响。当高速飞行器飞进大气层后,由于激波产生高温使空气电离,并形成等离子体鞘包裹在飞行器外部。通常等离子体鞘频率在 60~70 GHz 左右,传统的测量和通信方法难以穿透等离子体鞘层。太赫兹波频率远高于等离子体鞘层频率,可以穿透等离子体鞘层对飞行器进行通信和测量^[11]。因此太赫兹可广泛应用于空间通信场景,比如星间高速通信,星地间高速通信,空间飞行器通信等。

太赫兹波长较短,如果未来太赫兹天线系统可以实现小型化、平面化,太赫兹通信系统可通过搭载卫星、无人机、飞艇等天基平台和空基平台,做为无线通信和中继设备,应用于卫星集群间、天地间和千公里以上的星间高速通信,实现未来的空天地海一体化通信。

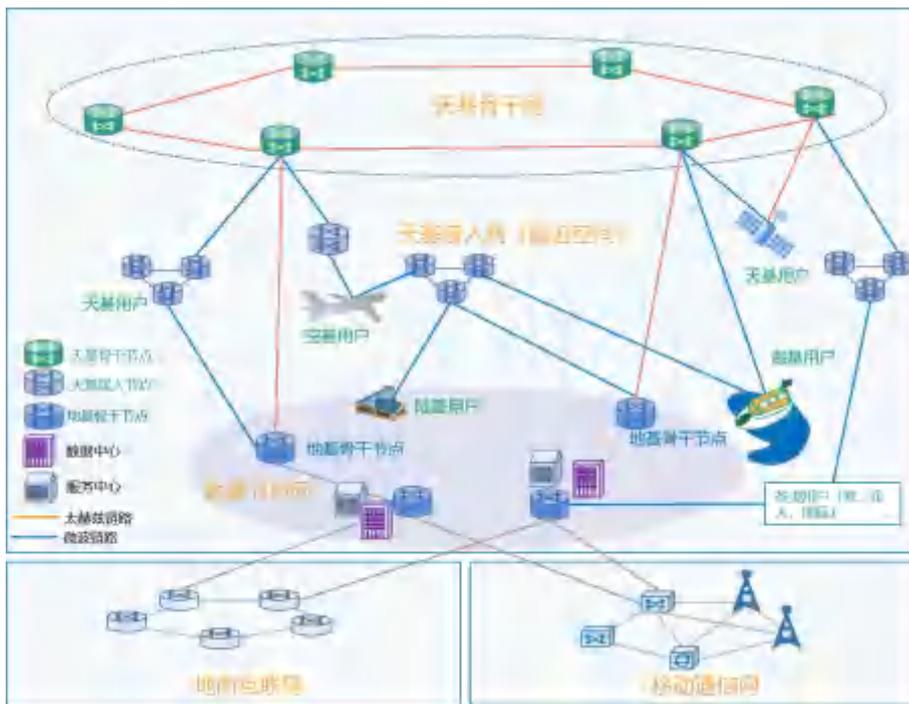


图 3.7 空天地一体化通信应用场景

3.3 微小尺度通信

太赫兹波长极短，随着太赫兹通信技术的持续突破和发展，未来有望实现毫米尺寸甚至是微纳尺寸的收发设备和组件，在极短距离范围内实现超高速数据链应用。随着石墨烯等新材料技术的兴起与发展，太赫兹通信除了传统的宏观尺度应用，还有望作为无线纳米网络通信频段，用于芯片的高速数据传输的片上/片间无线通信等^[12-14]，支持健康监测系统的可穿戴或植入式太赫兹设备，用于纳米体域网、纳米传感器网络^[13]等多种微小尺度通信应用场景，实现从宏观通信到微观通信的 6G 网络覆盖。

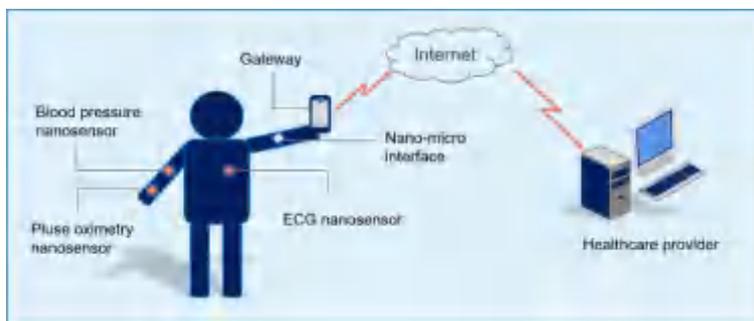
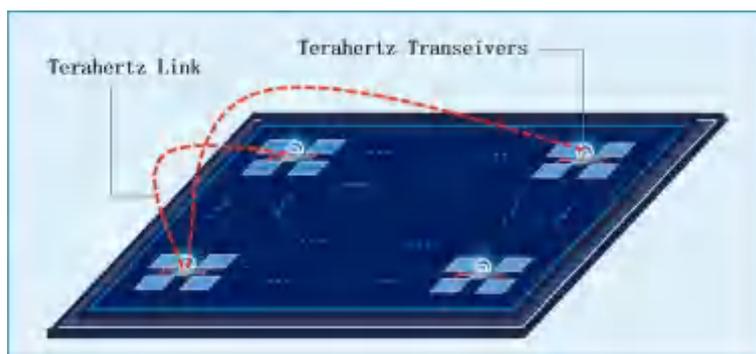


图 3.8 用于健康监测的纳米体域网^[13]

图 3.9 片上通信^[14]

微小尺度通信带有明显的 6G 愿景特征,从目前太赫兹通信的技术能力来看,未来需要通过将太赫兹技术与微纳技术的结合,以及新型材料和工艺技术的进展突破,实现毫微尺寸、高效率、低成本的大赫兹通信收发器件与设备。

综上,未来太赫兹通信设备有望应用于无线回传/光纤替代、无线局域网/个域网、无线数据中心和安全接入多种地面超高速通信场景,也可以通过搭载卫星、无人机、飞艇等天基平台和空基平台实现空天地海多维度一体化通信,与微纳技术结合应用于从宏观到微观的多尺度通信,成为未来 B5G/6G 通信网络的重要组成部分。

4 太赫兹通信关键技术及挑战

4.1 太赫兹通信关键器件及模块

4.1.1 太赫兹通信链路调制技术

太赫兹通信原型系统的链路调制方式目前主要有两种不同架构：一种是光电结合的方案，利用光学外差法产生频率为两束光频率之差的太赫兹信号，如图 4.1 所示。太赫兹通信原型系统光电调制方案的优点是传输速率高，缺点是发射功率低，系统体积大，能耗高，适用于地面短距离高速通信方面，较难于远距离通信。

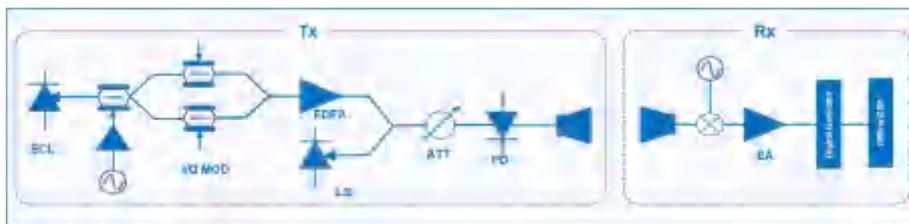


图 4.1 光电调制方案示意图



图 4.2 全固态电子混频方案示意图

另一种太赫兹通信链路是与微波无线链路类似的全固态电子链路，利用混频器将基带或中频调制信号上变频搬频到太赫兹频段，如图 4.2 所示。太赫兹通信原型系统全固态电子混频调制方案采用全电子学的链路器件，该类型方案的优点射频前端易集成和小型化，功耗较低，但是发射功率也较低，本振源经过多次倍频后相噪恶化，且变频损耗大，载波信号的输出功率在微瓦级，因此该类系统也需要进一步发展高增益宽频带功率。另外全固态电子系统还有一种实现方案是采用外部高速调制器直接对空间传输太赫兹信号进行调制，该类型方案的核心关键

技术为高速调制器，需要实现太赫兹波幅度或相位的直接调制。直接调制方案的应用优势在于易集成，体积小，发射功率较高（毫瓦量级），可用于实现远距离通信，但是受限于太赫兹高速调制器件能力，目前能实现的通信速率相对较低。

4.1.2 太赫兹关键器件

太赫兹通信的关键器件/芯片/组件是完成太赫兹通信设备的基础，也是目前制约太赫兹通信发展的核心与关键所在，国内外都高度重视太赫兹关键器件与芯片的研究。根据通信功能模块的不同，目前与通信设备相关的太赫兹全电子链路的关键器件主要包括太赫兹发射源、倍频器件/混频器、功放/低噪放、调制解调器等，材料工艺一般为 CMOS(互补金属氧化物半导体)、SiGe(锗硅)、GaAs(砷化镓)、GaN(氮化镓)、InP(磷化铟)等，如表 4.1 所示为太赫兹频段不同半导体工艺的特征频率和实现能力。

表 4.1 太赫兹频段不同半导体工艺特点^[11]

工艺	CMOS	SiGe	GaAs	GaN	InP
特征频率	<200GHz	<200GHz	<500GHz	<200GHz	200-500GHz
实现能力	COMS 的功率可以到 SiGe 的功率	小于 GaAs 的功率	目前功率已到极限，因为工艺耐压能力优先，提升功率必须高压容易击穿；噪声系数性能在太赫兹频段无法提升；混频器的变频损耗有天然缺陷；	功率是 GaAs 的五倍，成熟度够，缺陷较多	功率不高，不耐压，但是 NF 性能好

目前太赫兹通信全固态电子链路各类型关键器件已经在多个通信原型系统的无线传输能力试验中得到应用，器件功能已得到有效验证，但也存在一些性能方面的不足。比如关键器件的功率和效率较低（远小于 1%），由于工作带宽大导致收发链路相噪指标恶化，且变频损耗较大等。面向实际应用，除了需要不断优化和提升器件性能外，还需要解决小型化和低成本的问题，因此关键分立元器件的研制需要向太赫兹收发前端的集成化、芯片化方向进化。由于不同半导体工艺特征频率的存在，要融合多种工艺各自的独特优势，实现高集成度、高性能、

多功能的单片电路，需要研究异质集成电路技术^[11]。

综上，太赫兹关键器件技术需要发展和推进的技术方向主要包括更高功率和效率的突破，从分立元器件研制向低成本小型化集成化的进化等。太赫兹关键器件的高性能研发能力和低成本产业化能力对太赫兹通信技术未来应用落地具有至关重要的决定性影响，也是目前太赫兹通信最关键的技术发展方向。

4.1.3 太赫兹天线

太赫兹频段天线可能需要支持小到 2GHz, 大到 10GHz 以上的工作带宽，目前公布的太赫兹原型系统研发成果多采用喇叭天线或抛物面天线，这些天线可提供其中心频率 10% 的辐射带宽。而且为保证发射功率，目前全电子太赫兹原型系统中使用的太赫兹天线体积较大，不适合用于集成阵列天线和移动通信。

基于太赫兹通信的未来的应用愿景，太赫兹频段通信需要超宽带天线以及超大规模天线阵列来克服太赫兹频带中高路径损耗。超宽带、小型化、集成化太赫兹天线阵列的实现，也是未来面向实际场景应用时，太赫兹通信系统需要突破的关键技术挑战之一。从目前学术界的研究进展看，纳米材料和石墨烯等超材料有较高潜力应用于未来的太赫兹天线技术^[12-15]，用以实现超大规模超宽带太赫兹天线阵列的小型化和集成化。

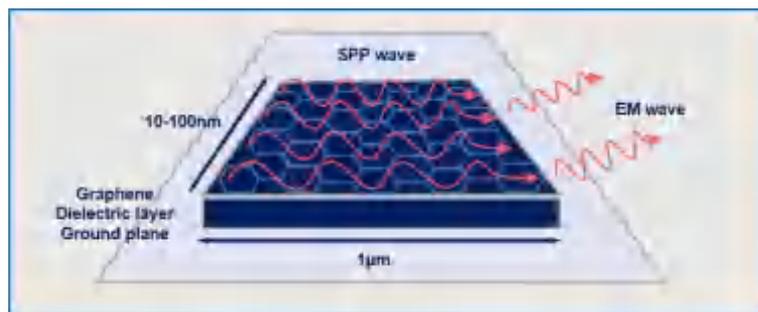


图 4.3 基于石墨烯的等离子体太赫兹波段天线^[13]

4.1.4 超宽带采样和高速基带处理

除了上述倍频器、混频器等太赫兹模拟器件外，超大带宽数模转换芯片和高速基带处理硬件也是也是实现太赫兹通信系统的关键芯片和功能模块。目前 5G

设备主要采用时间交织方案来实现大宽带采样速率需求,存在硬件成本较高和功耗较大的问题。太赫兹频段较高,可用频段的窗口频率多在几十 GHz,目前的太赫兹通信原型收发验证系统的工作带宽多在 GHz 量级(>2GHz),未来太赫兹通信系统的工作带宽预计也会远大于 5G 的高频毫米波段设备(400MHz/800MHz),当前采样芯片能力难以满足高达几十 GHz 的带宽需求。而超大带宽也往往意味着基带处理复杂度和运算资源需求都大大增加,给基带芯片带来更大的功耗和成本压力。

未来太赫兹通信系统的有效实现,需要以有效解决宽带数模转化和高速基带处理问题为前提。面临上述问题,技术路线一是研发更高采样速率、低成本、低功耗的超大带宽数模转化芯片;技术路线二是研究低量化精度信号处理系统,比如比特量化与信号算法的联合优化设计,联合自适应量化门限单比特解调优化,基于概率计算的 LDPC 译码器电路级 ASIC 等。未来太赫兹通信系统的实现可能需要两种技术路线的综合应用。

4.2 太赫兹传播特性及信道建模

4.2.1 太赫兹传播特性

外层空间,太赫兹可以进行无损传输,用很小的功率就可实现远距离通信。但在大气环境下,高自由空间损耗以及大气效应引起的额外衰减是一个巨大的挑战。大气和天气对无线电波传播的影响表现为衰减、相移和到达角的变化。这种现象包括分子吸收(主要是由于水蒸气和氧气)、散射和闪烁。在分子(气体)吸收方面,水蒸气是大气中最基本的吸收成分,在 300GHz 以上的某些波段衰减较大。

◇ 太赫兹波大气传播特性分析

在晴朗的天气中太赫兹波的衰减取决于电磁波和分子共振的频率差,当波的频率与共振频率重合时,衰减会达到最大值。分子共振引起的衰减可以达到很高的值,但也有衰减小于等于 100 dB/km 的频率窗,可根据以下三种衰减评估模型:MPM 模型^[16], AM 模型^[17]和 ITU-R P. 676-10 模型^[18]计算不同频段太赫兹波传输时

的损耗。其中 ITU-R P.676-10 模型可以被引用在 1 THz 以下的频率模型中。

如图 4.4 所示为 0.01-1THz 的太赫兹波在晴朗天气下的频率衰减谱。可以看到，太赫兹波在大气中的传播衰减率随着频率增加呈现指数增加的趋势，在 0.3THz 以下，太赫兹波的大气衰减低于 10dB/km，适合作为无线通信载波，而超过 1THz 的太赫兹频段由于极端的衰减不在无线通信传输的考虑范围内。图 4.4 中 A-J 各频点处呈现明显的波峰，这是由于太赫兹波在长距离传输时易受水蒸气、氧气分子的影响，出现分子共振效应，导致损耗急剧增大。因此在设计太赫兹室外远距离传输系统时，应选择合适的频率窗口进行传输，来获得较高的传输效率。

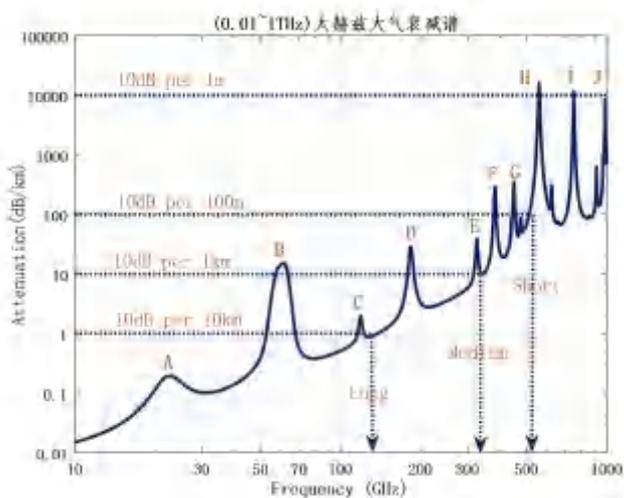


图 4.4 0.01-1THz 频段电磁波大气衰减损耗

◇ 太赫兹波雨天传播特性分析

在雨天环境中，空气中的雨滴球形散射会给太赫兹波带来额外的衰减，雨衰的大小与雨滴的直径有关，因此雨滴大小的分布是监测降雨以及预测雨衰的重要因素。在 ITU-R II.838-3 雨衰模型^[19]中计算了信号的衰减随着降雨速率、信号频率、偏振度等因素的变化函数。

图 4.5 展示了不同频率电磁波的水平极化波在多种雨天环境下的损耗^[20]，低于 10GHz 的雨衰可以忽略，10GHz-120GHz 的雨衰随着频率递增，超过 300GHz 到 900GHz 雨衰会随着频率递减，但仍维持一个较高的损耗水平，雨水吸收衰减将会使得太赫兹波应用于室外无线通信时面临较大挑战。

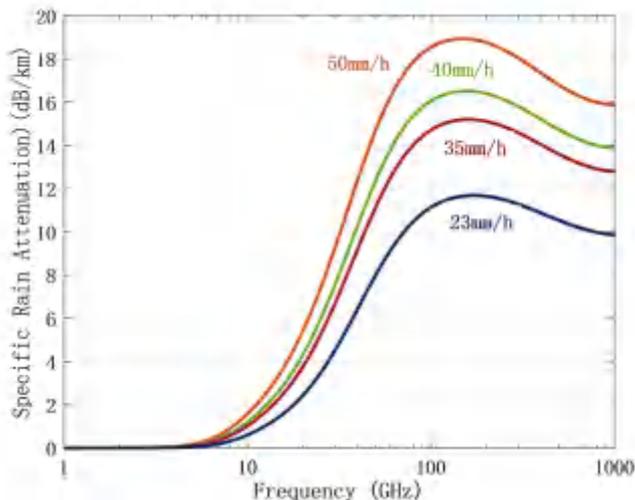


图 4.5 不同频率电磁波在雨天的损耗

◇ 太赫兹波雾天传播特性分析

在大雾天气中，太赫兹波的衰减随着频率和雾的密度增加而增加^[21]。图 4.6 展示了在 15° C 条件下，不同频段电磁波穿透 300m 范围的雾时 (0.05g/m³) 与穿透 50m 范围的雾时 (0.5g/m³) 的链路损耗对比。由图可知，对于 400GHz 以上的频率，在 50m 范围内 0.5g/m³ 的雾天环境下额外的衰减为 10dB/km，因此雾天环境也会影响太赫兹波的传输效率。

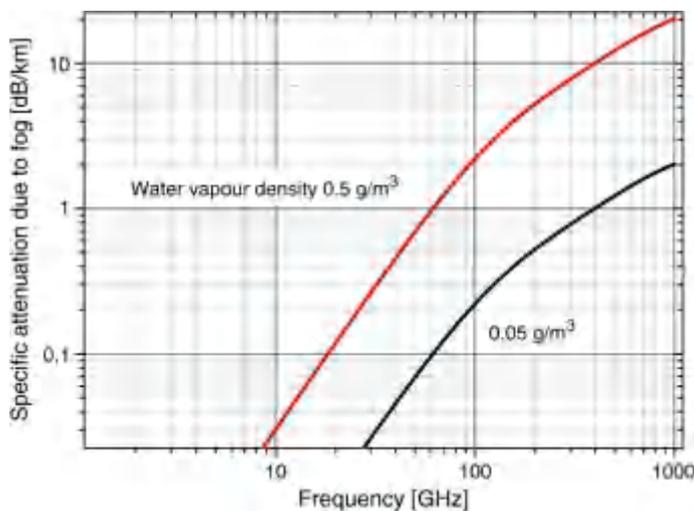


图 4.6 不同频段电磁波在大雾天气的损耗^[21]

◇ 不同天气太赫兹波传播特性对比

在自由空间中采用自由空间损耗计算公式^[3]描述太赫兹波的链路损耗。图

4.7 显示了参考距离为 1km 时，不同频段电磁波在晴朗天气、多雨天气、以及叠加自由空间损耗的晴天和雨天环境中的链路损耗对比，所考虑的晴天和雨天两个场景分别代表最佳和最差的环境条件。可以看到，50mm/h 的降雨速率会导致最大的衰减值，通常来说该环境是未来太赫兹通信系统运行的极限情况。

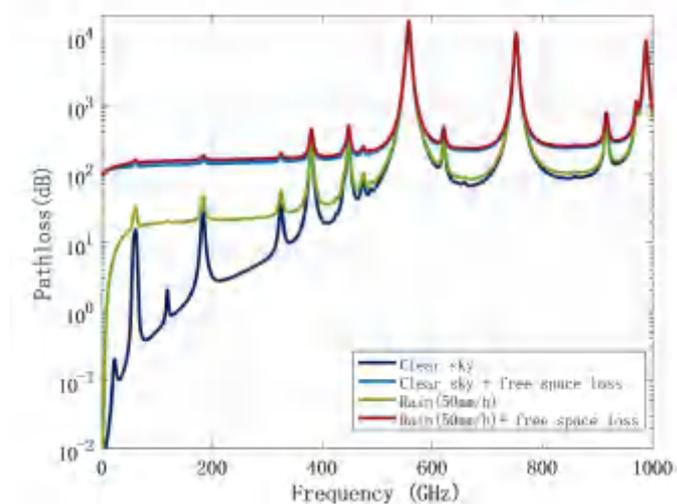


图 4.7 不同频段在晴朗天气与雨天场景的损耗图

4.2.2 太赫兹信道建模

太赫兹信道模型建模方法一般有参数化统计信道建模、确定性信道建模和参数化半确定性建模等三种类型：

- ✧ 统计信道建模方法。该类方法基于典型场景的实测结果，无需地图信息，复杂度低，多用于系统仿真和链路级仿真，标准化成熟度高，是 3GPP 标准化建模方法，适用于 5G 移动通信。
- ✧ 确定性信道建模方法。该类方法主要通过导入目标场景的地图模型，利用射线追踪 (Ray Tracing) 技术^[22]，对电磁传播中譬如直射、透射、反射、衍射等主要物理现象，进行传播环境精确重构和确定性计算，得到了构成实际传播的主导分量 (Dominant Ray) 的确定性结果，该类方法准确度高，计算复杂度高。
- ✧ 参数化半确定性建模方法。该类方法结合了信道的确定性和统计特性，将关键多径分量用确定性模型计算，其余丰富的多径通过统计学方法计算，该类

建模方法准确度较高，计算复杂程度与射线追踪方法比相对较低。

由于太赫兹波衰减较大，多径少，且趋于光学特性，信道传播路径稀疏性较强，未来太赫兹频段可能更适合使用确定性信道建模或参数化半确定性信道建模方法，比如射线追踪方法，以及结合确定性和统计特性的数字地图混合建模方法等。无论是哪种类型的建模方法，都需要以大量的信道实测试验为基础。但目前尚未有针对全面的应用场景、支持太赫兹全频段的充分实测数据支撑的太赫兹信道建模工作。

对太赫兹波传播特性的分析和信道的准确建模是提高频谱利用效率，实现无线通信网络优化部署的前提，也是实现太赫兹通信技术有效应用的前提，因此太赫兹传播特性和信道建模是太赫兹通信亟待深入研究和进行广泛测试验证的基础技术方向。

未来太赫兹通信可能会用于空天地海多维度、宏观到微观多尺度的多样化应用场景，太赫兹通信信道建模需要分析研究多种应用场景下的信道模型，用于指导未来实际的应用方案部署。

4.3 太赫兹通信空口技术

4.3.1 超大规模阵列天线

与5G高频使用的毫米波段相比，太赫兹信号频段更高，空间传播损耗和穿透损耗也明显变大。基于通信覆盖的需求，多数大尺度通信应用场景下，太赫兹通信设备极有可能会继续采取一体化的超大规模天线阵列方案，用以保证发射和接收的波束增益，实现有效通信。太赫兹通信超大规模天线技术未来涵盖的技术内容与5G大规模天线技术之间存在较强的演进关系，包括信道建模、多天线传输方案、参考信号设计，信道状态估计、Massive MIMO混合预编码、模拟波束管理以及波束协作技术等等。

太赫兹电磁波的绕射能力非常差，在遮挡时很难实现可靠的通信，因此需要考虑分布式接入节点以及新型反射体/反射材料的部署来改善信道状况，太赫兹

天线阵列结构设计是一个重要的研究方向。

由于传播损耗较大，基于增益需求，太赫兹通信设备可能从接入阶段可能就需要使用窄波束才能够建立通信。大量窄波束意味着极大的导频(包括同步信号)开销、搜索复杂度和波束训练延迟，需要对现有的波束训练机制进行优化，对空间稀疏特性进行更充分的利用。该方向研究可以结合大规模太赫兹天线阵列高角度分辨率和高多普勒频移信息的利用，将定位技术和太赫兹窄波束通信互相辅助结合保证性能的有效性。在带来上述技术优势的同时，超大规模天线阵列的应用也引入一些待探讨的关键技术问题，比如阵列实现架构设计、波束赋形对病态信道信息的鲁棒性等。

与 5G 大规模天线技术类似，太赫兹通信使用的天线数量和规模较大，可赋形的波束宽度会比毫米波设备更窄，空间自由度更高带来的问题是波束赋形性能对系统误差的敏感性更高，在保证高增益窄波束的工作状态下，天线通道间的幅相误差、互耦误差、位置误差，用户设备的高速移动都易导致波束跟踪失败或失效。另外超大规模天线阵列系统中，容易出现个别天线通道和阵子产生故障或失效，产生系统误差，对波束赋形功能产生影响。因此研究有效的针对超大带宽的大规模混合赋形阵列校准技术，和对系统误差具有鲁棒性的波束赋形算法，设计对系统误差具有检测和容错机制的波束管理方案等，对于超大规模天线技术在太赫兹通信中的有效应用都具有重要的研究意义。

4.3.2 太赫兹通信物理层设计

基于太赫兹的频谱特性，太赫兹通信必然具有超大带宽、超高速率的特点，除了硬件无线链路传输能力的支持，对于无线接入的场景，太赫兹通信系统也需要设计相应的物理层技术。太赫兹通信的多种应用优势，包括超大带宽、超高速率等，需要通过对帧结构、波形调制和调制编码等物理层相关技术设计来保证和体现。太赫兹通信物理层技术将会成为承载太赫兹通信技术特征和优势的核心关键技术。

未来太赫兹通信系统链路存在的一些非理想特性，例如相位噪声、高路损、

在变频损耗较大、采样带宽受限、基带处理功耗大等等，也需要通过系统链路各种非理想特性和因素的算法设计和补偿来应对。

目前对于太赫兹通信物理层技术方向，全面而深入的研究尚未启动，成型的研究进展成果较少，仅有少量对于太赫兹通信低频段物理层技术的讨论，且多数是在 5G 技术研究时期提出的新型理论设计。下面将从帧结构、波形设计和调制编码技术等方面介绍业界在上述方向已有的一些技术观点，并对太赫兹通信物理层技术未来面临的问题和难点进行初步探讨。

◇ 帧结构设计

太赫兹频率具有超大带宽资源可供利用，未来太赫兹通信系统的工作带宽可能高达几十 GHz。目前业界对于太赫兹低频段通信有一些物理层相关技术的讨论，有观点认为可以继续以正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）为技术基础来设计新波形，帧结构参数集（Numerology）可以按照子载波间隔 $\Delta f = 2^n \times 15\text{kHz}$ 设计，增加较大的子载波间隔，比如到 480kHz 或 960kHz 等。

无论是原有的 OFDM 为基础的帧结构设计，还是面向 6G 技术的新型波形设计和帧结构参数集设计，都需要在有效提升频谱利用效率的同时，能够有效应对硬件链路相噪、变频损耗等问题。此外，在帧结构设计时也需要考虑到基带运算资源和复杂度的问题，例如单符号（Symbol）数据长度过大，则会导致基带处理时 FFT 运算量过大。

◇ 波形设计

太赫兹通信系统目前在系统链路的性能上面临很多挑战，这些挑战包括：PAPR 效率低、相位噪声大、路损大、工作频段宽、以及器件性能受限等，为了克服这些问题，需要进行新波形研究。新波形的设计除了需要在带外抑制、时频同步偏差鲁棒性等方面有性能增强外，还需要有良好的可扩展性，能够通过简单配置修改用以支撑新的应用场景和业务需求，而且能够和调制编码、新型多址和大规模天线技术等实现良好兼容。

一些 5G NR 技术研究时期提出新型多载波候选波形也被讨论是否可以应用于未来 6G 通信，例如滤波正交频分复用波形 (Filtered OFDM, F-OFDM)，通用滤波器正交频分复用 (Universally Filtered OFDM, UF-OFDM) 波形和滤波器组多载波 (Filter Bank MultiCarrier, FBMC) 波形等。这些技术的共同特征是都是使用了滤波机制，通过滤波减小子带或子载波的频谱泄露，从而放松对时频同步的要求，避免了 OFDM 的主要缺点。

上述几种候选波形都存在峰均比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) 很高的缺点。在未来太赫兹通信超大带宽配置 ($\gg 2\text{GHz}$) 条件下，PAPR 可能会进一步有较大幅度提升，对系统射频性能和功耗能效造成不利影响，需要进一步研究更适用于太赫兹通信超大带宽需求的波形技术。

◇ 调制编码方式

5G NR 的基本调制方式可能还会继续使用。由于高频场景路损大而且功率放大器效率低，因此有必要研究更低峰均比的调制技术。目前业界的研究进展，包括，FDSS (Frequency Domain Spectrum Shaping, 频域赋形) 调制方案，如 $\pi/2$ BPSK+FDSS, CPM (Continuous Phase Modulation, 连续相位调制) 方案，抑制相位噪声能力相对更好的 APSK 调制方案以及 1-D $\pi/4$ BPSK 方案等。

对于太赫兹波段的超宽带和高比特率通信，在设计和选择信道编码时要考虑到解码功率和解码时间。在太赫兹编码技术方面主要存在以下两方面挑战：一是要表征太赫兹波段的误差源。太赫兹波段信道的特性，特别是分子吸收噪声和多径衰落，决定了产生信道比特错误的概率以及错误的特性。二是需要开发新的低复杂度的信道编码方案，同时考虑发射功率和解码功率。例如，在短距离通信的情况下，结合基于飞秒长脉冲的调制的低权值编码方案可用于防止信道错误发生，避免事后校正。

太赫兹通信的频谱特性和超大带宽应用很可能会给太赫兹通信的物理层设计带来较大改变。除上述讨论的技术内容外，多天线处理、资源映射、控制传输信道、导频设计、波束管理等太赫兹通信物理层技术，也会面临众多应用问题和挑战。该方向研究业界建议的技术发展路线是：先分析研究太赫兹通信技术特点、

挑战和问题，再基于特点、挑战和问题，进行物理层相关技术内容的新型设计，并根据太赫兹通信技术特点和 6G 研究进展成型物理层技术的架构设计，逐步推动标准化进程。

4.3.3 太赫兹通信资源调度管理

太赫兹频率具有超大带宽资源可供利用，但是由于模拟器件的带宽覆盖能力、大带宽一致性，以及数模转换和宽带采样芯片的限制，可能需要考虑类似 5G NR 的 BWP (Bandwidth Part, 带宽块) 技术思路，用以实现频段资源的灵活配置和分段利用。此外，太赫兹频谱的许可、使用、管理与经营方式相对传统低频段频谱将可能发生很大的变化。这部分频谱是独占式的许可频谱，非独占方式的非许可、频谱接入共享，还是地区或应用特定的微许可，以及将蜂窝无线接入与前传/回传频谱共享的 IAB(Integrated Access Backhaul, 接入回传一体化) 方式，都将给太赫兹通信的频谱资源管理带来挑战^[11]。

合理的资源分配与调度技术方案对于宽带系统频率利用效率的提升、多用户调度增益的体现、以及干扰的管理与抑制都具有极为重要的作用。对于带宽资源极为丰富的太赫兹系统而言，对无线资源应用的灵活度得以极大的提升，而如何在广阔的可用资源中以合理的计算复杂度和时延更加优化地进行资源分配和调度以进一步提升整体系统效能，将会是一个巨大的挑战。

可以预期的是，未来太赫兹通信空口技术的架构设计应该具有足够的灵活性，可以支持频谱和带宽资源的动态配置、波束接入的智能管理，以及高低频、空天地多维度、宏观到微观多尺度的空口协同和信息融合，支持覆盖多种太赫兹通信应用场景。未来空口设计方案需要具有上述能力和特点才能适配 6G 太赫兹通信的技术特征和优势。目前 6G 技术研究仍处于探索起步阶段，技术路线尚不明确，需要产业界共同参与研究，积极探讨，逐步厘清未来太赫兹通信空口技术路线和发展方向。

5 太赫兹通信产业进展及发展建议

5.1 标准化进展

◇ 国际电信联盟 ITU

ITU 在世界无线电大会 WRC-2012 5.565 上将 275-1000GHz 内的多个频段划分给被动业务应用，包括射频天文学业务、地球探测卫星和空间研究等。ITU 已经指定分配 0.12THz 和 0.22THz 频段分别用于下一代地面无线通信和卫星间通信。WRC-2015 第 767 号决议，确定了 WRC-2019 关于 275-450GHz 频段用于陆地移动和固定业务的议程。2019 年 11 月，WRC-2019 会议议题 1.15 为 275-450GHz 频率范围操作的陆地移动和固定业务应用确定频谱，如图 5.1 所示，新增 275-296GHz、306-313GHz、318-333GHz、356-450GHz 四个全球标识的移动业务频段，并且出现了两个超大带宽频点 275GHz (252-296GHz, 带宽 44GHz) 和 400GHz (356-450GHz 带宽 94GHz)。

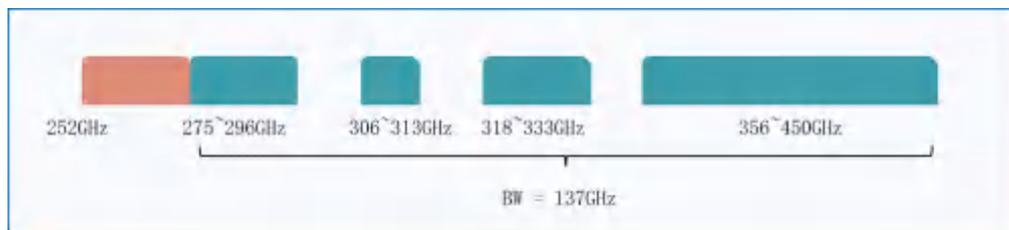


图 5.1 WRC-2019 议题 1.15 太赫兹频谱划分情况

2018 年 8 月，ITU-T SG13 下开设 FG NET-2030 焦点组，关注系统愿景和应用需求研究。2019 年 5 月，ITU FG NET-2030 工作组发布白皮书^[23]，对现有网络的挑战和未来通信网络特征进行了蓝图定义，包括全息通信、多感知网络、时间确定性应用等。

2020 年 2 月，ITU-R WP5D 工作组会议上，面向 2030 及 6G 的研究工作正式启动。本次会议初步形成了 6G 研究时间表，包括未来技术趋势研究报告、未来技术展望建议等重要规划节点。

目前 ITU 尚未确定 6G 标准的制定计划。

◇ 美国电气电子工程师学会（IEEE）

IEEE 较早启动并积极推进太赫兹通信的标准化工作。IEEE802.15 于 2008 年成立太赫兹兴趣小组 (THz Interest Group, IG THz), 重点关注在 275-3000GHz 频段运行的太赫兹通信和相关网络应用。IG THz 专注于开放频谱问题、信道建模等技术的发展。

IEEE802.15 于 2013 年 7 月成立研究组 SG 100G, 朝着制定新标准迈出了一步。该研究组于 2014 年 3 月完成其工作, 并建立了 3d 任务组。2017 年, 3d 任务组发布了 IEEE Std. 802.15.3d-2017^[10], 该修订案以 IEEE Std. 802.15.3c 为基础, 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 252GHz 到 325GHz, 是第一个工作在 300GHz 的无线通信标准。

◇ 第三代合作伙伴计划（3GPP）

3GPP 方面目前对外发布的资料是预计 2023-2026 年启动 6G 研究; 2026-2028 年启动 6G 标准研究。

如图 5.2 所示为业界对于 B5G/6G 太赫兹通信技术标准时间窗的预测, 可以看到距离太赫兹通信技术标准化, 有 3-6 年关键技术研究的时间窗口。



图 5.2 B5G/6G 太赫兹通信标准时间窗预测

◇ 中国通信标准化协会（CCSA）

CCSA 无线通信组前沿无线技术子组 (TC5 WG6) 2018 年已启动 B5G/6G 相关立项研究, 内容涵盖 B5G/6G 系统愿景与需求, 潜在无线新技术, 可将光通信和太

赫兹通信技术等方向。

5.2 国际各区域产业进展

5.2.1 美国

美国是较早启动太赫兹研究的国家,认为太赫兹科学是改变未来世界的十大科学技术之一。2009年起,美国国防部高级研究计划署(DARPA)和美国国家航空与航天局(NASA)均投入较大资金和力量,用于太赫兹关键组件及系统的研发。DARPA启动了“THOR(Terahertz Operational Reachback,太赫兹作战延伸后方)”的研究计划,该计划包含研发与评估一系列可用于移动自组网的自由空间通信系统的技术,并投入大量经费研制0.1-1THz频段太赫兹通信关键器件和系统;2013年提出了100Gbit/s骨干网计划,致力于开发机载通信链路实现大容量远距离无线通信,2020年美国预计其通信卫星将可能具备50Gbit/s以上的传输速率。

图5.3所示为美国贝尔实验室的0.625THz通信系统^[24],是目前采用全电子方式实现的最高载波频率的太赫兹通信系统。美国的纽约大学、麻省理工、乔治亚理工大学、东北大学、普林斯顿大学、加州大学伯克利分校等众多研究机构也纷纷加入太赫兹技术研究中,并有多个技术成果发布^[25, 26]。

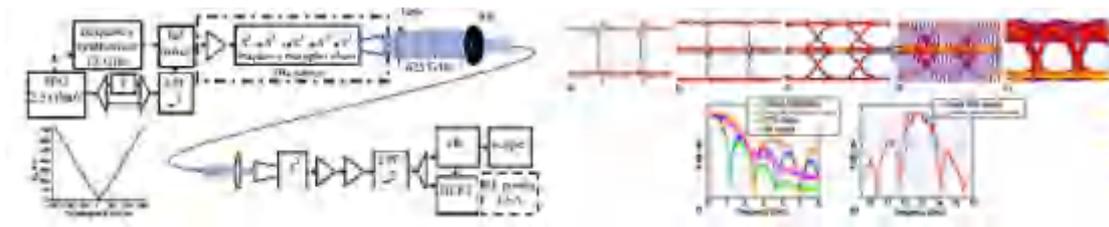


图 5.3 美国贝尔实验室的 0.625THz 通信系统^[24]

2019年3月,美国联邦通信委员会(FCC)对未来移动通信应用开放了从95GHz到3THz频段,鼓励相关产业机构加入到太赫兹无线移动通信的应用研究中,该举措应该会对美国太赫兹通信技术的应用研究和产业推进有积极推动作用。

目前在关键器件的产业化方面,美国仍处于国际领先地位,VDI等器件厂商的太赫兹关键器件覆盖种类和支持频段均比较完备,技术产业较为成熟。

5.2.2 欧洲

欧洲 2014 年启动了“2020 地平线计划 (Horizon 2020)”，包含了众多太赫兹相关的技术簇资助项目^[27]：

“TERAPOD”项目，由沃特福德理工学院牵头，计划是研究和论证超高频无线接入网络在太赫兹波段运行的可行性，包括太赫兹无线链路在数据中心、无线个人区域网，无线局域网等；

“TERRANOVA”项目，由希腊 Piraeus 大学牵头，计划通过开发高于 275 GHz 的频率，将光纤系统的体验质量扩展到无线连接，实现达到 Tbps 数据速率和接近“零延迟”的 B5G 网络；

“DREAM”项目，由芬兰国家技术研究中心(VTT)牵头，旨在通过利用 D 波端 (130-174.8 GHz) 实现高达 100Gbps 的无线传输技术。

“EPIC”项目，由澳大利亚 Technikon 公司主导，旨在利用下一代信道编码实现的无线 Tbps 速率通信，目标是开发新一代的 FEC (Forward-Error-Correction, 前向纠错) 代编码技术，使其成为达到太比特速率 B5G 网络的一种基本实现方案。

“ULTRAWAVE”项目，由英兰卡斯特大学牵头，目标是开发 140-300GHz 以上频段，超过 100Gbps 速率的高容量无线回传技术。

“WORTECS”项目全称是 Wireless Optical/Radio Terabit Communications (太比特无线光通信/无线电通信)，目标是结合无线电通信和无线光通信技术，探索 90 GHz 以上频谱太比特量级的通信能力。

“THOR”项目，是欧盟和日本的一个联合项目，目标是为 B5G 网络提供 300 GHz 附近频谱的射频无线链路技术解决方案，能够满足 B5G 系统所需的 200+ Gbps 的数据速率，在连接性、数据流量密度和容量以及所需的多层次超密度方面实现巨大增长。

“iBrow”项目，英国格拉斯哥大学牵头，旨在研究 90-300GHz 之间的超宽

带太赫兹收发无线通信设备。

欧盟第 5—7 框架计划中启动了一系列跨国太赫兹研究项目，包括以英国剑桥大学为牵头单位的 WANTED 计划、THz-Bridge 计划，欧洲太空总署启动的大型太赫兹 Star-Tiger 计划，德国 Dresden 大学牵头成立的欧洲太赫兹旗舰研究联盟 TeraFlag 等。

除了众多太赫兹通信方向研究计划的资助，欧洲在太赫兹通信原型系统方面也有较多研究进展及成果：德国弗劳恩霍夫应用固态物理研究所（IAF）、卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）等机构一起，在 2011 年完成了基于 InP mHEMT TMIC 的全固态 0.22THz 通信系统^[28-30]，并实现了 OOK 与 QAM 两种调制体制，如图 5.4 所示；IAF 在 2013 年在 0.24THz 上基于全电子方式实现了 40Gbps 速率，1km 距离的无线传输，系统实物和实验场景如图 5.5(a)所示^[31]。此外 IAF 还在日本 NTT 研制的光电方式的太赫兹通信系统上实现了 20m 距离 100Gbps 速率的无线传输和离线解调，如图 5.5(b)、(c)所示。

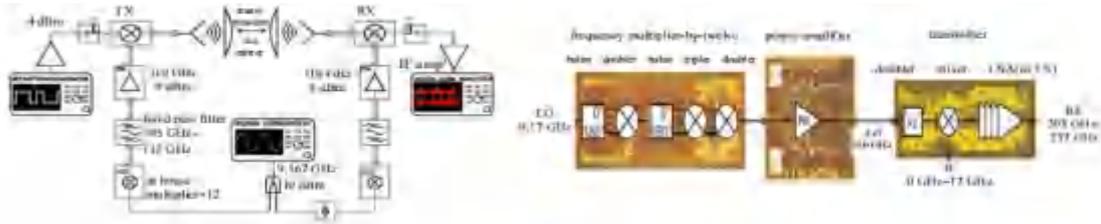


图 5.4 德国 IAF 的 0.22THz 太赫兹通信系统^[28]

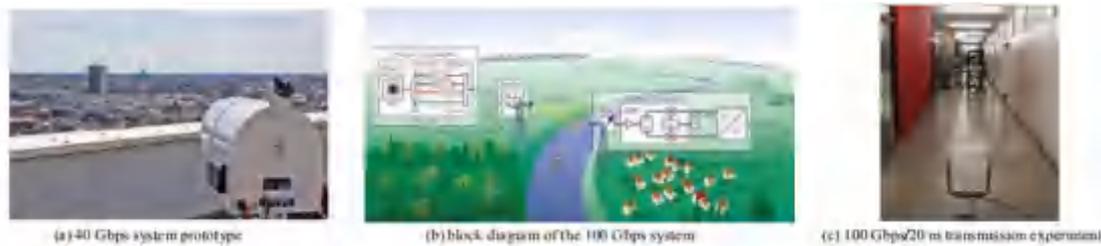


图 5.5 德国 IAF 的 0.24THz 太赫兹通信系统^[31]

5.2.3 日本

日本也是较早启动太赫兹技术研究的国家。日本电报电话公司 NTT 2006 年实现了频率 0.12THz，传输距离 15km 的太赫兹无线通信演示系统，完成世界上

首例太赫兹通信演示，如图 5.6 所示^[32, 33]，并在并在 2008 年成功用于北京奥运会的高清转播。NTT 目前正在全力研究 0.5THz-0.6THz 高速大容量无线通信系统，曾计划在 2020 年东京奥运会上采用太赫兹通信系统实现 100Gbit/s 的高速无线局域网通信。

日本政府将太赫兹技术列为未来 10 年科技战略规划 10 项重大关键科学技术之首。日本计划通过官民合作制定 2030 年实现“后 5G”（6G）的综合战略。据报道，该计划由日本东京大学校长担任主席，日本东芝等科技巨头公司将会全力提供技术支持，在 2020 年 6 月前汇总 6G 综合战略。日本经济产业省 2020 年计划投入 2200 亿日元的预算，主要用于启动 6G 研发。NTT 集团于 2019 年 6 月份提出了名为“IOWN”的构想，希望该构想能成为全球标准。2019 年 10 月，日本 NTT 和英特尔宣布建立合作伙伴关系，共同致力于 6G 移动网络技术开发。

除运营商外，日本众多研究机构加入太赫兹通信技术研究工作。图 4.6 所示为大阪大学发布的太赫兹通信设备实例。2019 年 2 月日本广岛大学、国家信息通信技术研究所（NICT）以及松下公司宣布开发出基于 CMOS 低成本工艺的 300GHz 频段的太赫兹收发器，能够使用 IEEE 802.15.3D 标准定义的信道以 80Gbit/s 速率收发数据。



图 5.6 日本 NTT 的 0.12THz 通信系统实物与实验场景^[32, 33]

日本电报电话公司（NTT）集团旗下的设备技术实验室利用磷化铟（InP）化合物半导体开发出传输速度可达 5G 五倍的 6G 超高速芯片，目前存在的主要问题是传输距离极短，距离真正的商用还有较远距离。

日本在太赫兹等各项电子通信材料领域全球领先优势明显，是其发展 6G 技

术的独特优势。

5.2.4 韩国

韩国确立了全国太赫兹科学技术发展计划（2009-2019）和太赫兹科学研究计划（2013-2021）。

2019年1月，LG与韩国高级科学技术学院KAIST合作建立6G研究中心。

2019年6月，三星成立高级通讯研究中心，开始对6G网络进行研究。韩国SK电信公司宣布将会与芬兰诺基亚公司和瑞典爱立信公司共同开发6G核心技术。

5.3 国内产业进展

◇ 重大专项及课题支持

我国政府各级部门十分重视太赫兹科学技术的发展，多个部委设立了太赫兹的相关研究计划。

2005年，第270次香山科学会议设立主题“太赫兹科学技术”，开启我国太赫兹技术研究的序幕。

2010年，科技部“863”项目将“毫米波与太赫兹无线通信技术开发”列为专项课题。

2013年，国家自然科学基金委与中国科学院联合成立“太赫兹科学技术前沿战略研究基地”。

2015年，科技部“863”计划支持了“毫米波与太赫兹无线通信技术开发”的项目，参与单位包括国内10多所高校。

2018年科技部重大专项开展“太赫兹无线通信技术与系统”课题。

2019年科技部重大专项更是包含多项与太赫兹通信相关的方向课题：“非对称毫米波/亚毫米波大规模MIMO关键技术研究及系统验证”，“与5G/6G融合

的卫星通信技术研究及原理验证”，“星间太赫兹组网通信关键技术研究（频段在 200GHz 以上，峰值速率大于 50Gbps，功率大于 5W）”。

2019 年国家自然科学基金委在 2019 年将“太赫兹核心器件与收发芯片”独立列为移动网络专项基金支持方向。

◇ 研究机构及行业组织

在国家支持和引导下，以高校和科研院所为代表的科研机构纷纷投入太赫兹研究热潮中，并以不同形式进行了互通协作，共同推动国内太赫兹技术和产业进展。

2012 年，电子科大牵头成立太赫兹科学协同创新中心，参与单位包括南京大学、清华大学、中科院电子所，中科院光电所等众多科研单位。

2013 年国家自然科学基金委员会和中国科学院组织成立了太赫兹科学技术前沿交叉研究基地。

2015 年，华讯方舟与包括电子科技大学、清华大学在内的多个国内高校合作创办了深圳太赫兹科技创新研究院。

2019 年工信部联合太赫兹产业上下游多方机构，成立了毫米波太赫兹产业发展联盟，共同推动太赫兹技术产业化发展。

2019 年工信部 6G 研究组无线技术工作组成立了太赫兹通信任务组，做为未来 6G 通信的重要候选技术，召集各相关产学研用机构，研究讨论太赫兹通信关键技术、应用愿景和标准化等方面的工作。

◇ 研究成果及进展

经过十余年的技术发展，中国太赫兹高速无线通信在关键核心器件与原型系统方面已经取得了众多进展^[34-45]。如图 5.7 所示为 2011 年中国工程物理研究所研发国内首个太赫兹频段的 0.14THz 无线通信原型系统；图 5.8 所示为电子科技大学研发的 0.22THz 无线通信原型系统。电子科技大学、中国工程物理研究所、中电 13 所、中科院上海微系统所、天津大学、湖南大学、浙江大学、复旦大学等众多高校和科研院所都在太赫兹核心关键器件和通信原型系统的开发上取得

了众多技术成果^[34-45]，达到了世界先进水平。

表 5.1 所示为国内部分研究单位及关键器件方向的总结。表 5.2 所示为部分国内已发布太赫兹通信原型系统及研究单位情况。



图 5.7 中国工程物理研究所 0.14THz 无线通信原型系统^[44]

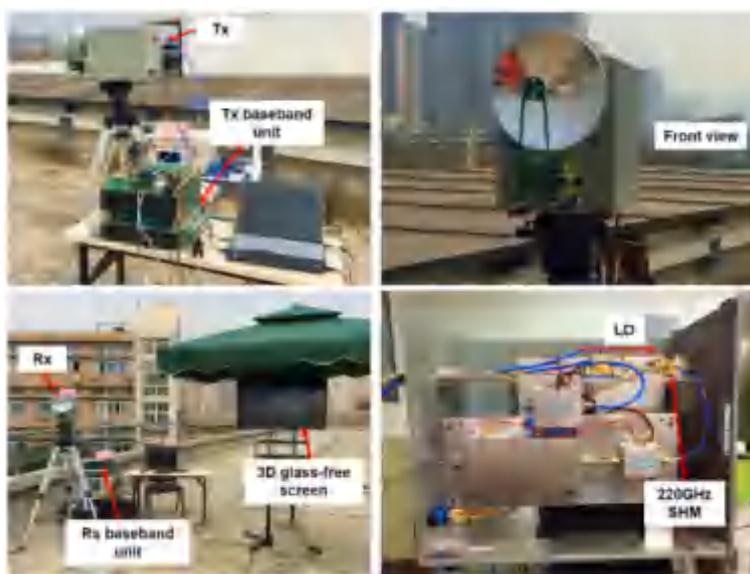


图 5.8 电子科技大学 0.22THz 无线通信原型系统^[45]

表 5.1 国内部分太赫兹通信研究单位及研究方向

研究单位	研究方向
电子科技大学	大功率太赫兹源，新型太赫兹源、太赫兹准光器件、太赫兹通信、太赫兹有源超表面、太赫兹成像系统前段关键技术、太赫兹高速直接调控器件及应用，太赫兹增强核磁共振技术、太赫兹近场成像

中国工程物理研究所	太赫兹源、太赫兹半导体器件
中科院上海微系统所	太赫兹量子器件及其成像
中电 41 所	太赫兹倍频源
中科院电子学研究所	太赫兹成像
天津大学	太赫兹波谱成像、太赫兹辐射源、太赫兹光纤激光技术
北京大学	太赫兹自由电子激光器、放大器
清华大学	太赫兹功率放大器
武汉理工大学	太赫兹微带天线阵列
紫金山天文台	太赫兹倍频器
复旦大学	毫米波与太赫兹波波导
武汉光电国家实验室	太赫兹光通信器件、生物医学光子学等
浙江大学	太赫兹光电通信器件
哈尔滨工业大学	毫米波太赫兹成像探测技术
南开大学	太赫兹功能材料电磁特性与器件研究, 铁磁纳米颗粒调控增强的太赫兹液晶显示相移器

表 5.2 国内部分太赫兹通信研究单位及原型系统

机构	原型系统
中国工程物理研究所	<p>2011 年, 在 0.14THz 频段实现 10Gbit/s 的 16QAM 信号无线通信系统, 同时进行 4 路 HDTV 信号的实时传输与解调, 传输距离到达 500m。</p> <p>2014 年, 使用纯电子器件方式实现了国内首个 50m 视距信道下的 0.34THz 数据链路, 能实时调制和解调 3Gbit/s 的数据。</p> <p>2017 年, 在 0.14THz 频段载波上使用 OOK 调制实现了 16Gbit/s 的无线通信。</p>
电子科技大学	<p>2016 年, 在 0.22THz 频段上实现了全固态太赫兹无线通信实验系统, 该太赫兹通信系统能够在室外环境中实现 10Gbps 以上 200m 通信距离的实时 3D HD video 信号传输。</p> <p>2019 年, 研制出工作频率大于 0.2Thz, 传输速率大于 20Gbps, 传输距离大于 1000m, 误码率$\leq 10^{-6}$, 捕获跟踪精度优于 0.01 度的太赫兹高速通信系统。</p>
中科院上海微系统所	2013 年, 采用量子级联激光器已实现了 4.13THz 频段上传输速率为 100Mbit/s 的演示系统
天津大学	2016 年, 通过光频梳外差混频实现 400GHz 频段通信系统, 总数据速率为 80Gbit/s。
浙江大学	2016 年, 实现了 300-500GHz 频段的光无线链路, 达到 160Gbit/s 的传输速率。
复旦大学	2017 年, 实现了首个多载波 2×2 MIMO 太赫兹通信链路, 能传输

5.4 产业发展建议

目前国内太赫兹通信方向研究成果多为学研机构的关键分立器件和原型系统，在芯片集成、能耗和成本等方面离产业化成熟还存在较远距离，处于技术研发能力较前沿、产业化较落后的现状。太赫兹通信的产业现状落后主要有以下两方面因素：

起步晚、基础差。我国半导体和高频器件产业起步晚，产业化程度低，在化合物半导体材料等基础领域技术落后、产能不足，缺乏先进成熟的半导体制造工艺，核心器件尤其是高频模拟器件是通信产业短板已是业界共识。此外我国的高频器件和芯片技术一直面临国外的严密专利布局和技术封锁，限制了我国太赫兹通信关键器件研产能力和发展水平。

市场需求不迫切。随着 5G 商用化进展，国内企业在毫米波段高频器件方向不断有蓄力突破的规划和行动。相比毫米波段高频器件，太赫兹频段通信类器件由于行业需求迫切程度较低，产业热度不高。太赫兹通信关键器件方面国内技术进展和成果多为学研类机构，器件厂商、设备厂商和运营商参与程度低。缺少应用需求的牵引，就缺少产业化动力和方向，无法有效推动产业化进展和构建产业生态。太赫兹通信技术需要由以应用需求牵引推动，汇聚产学研用力量，共同解决技术、产品、标准等问题，推动太赫兹通信技术产业化进程。

未来的太赫兹通信技术需要国家从政策扶持和产业引导等多方面推动，加快太赫兹通信技术产业化进程。

政策扶持方面，需要国家继续加大对太赫兹通信技术相关课题和项目的投入和支持，并开始在学习类课题基础上逐步增加示范类应用要求，鼓励支持器件厂商、设备厂商和运营商等产业链角色的加入，基于应用需求布局课题项目研究，促进产学研用结合，推动产业发展。除了与关键器件和系统相关的技术研究，也需要启动太赫兹通信空口技术相关的课题研究，鼓励和支持该方向相关技术专利和标准的输出，为我国在未来 6G 通信的技术专利和标准化布局做好技术储备。

产业引导方面，支持和鼓励设备厂商和运营商尽早明确应用场景和技术需求，以应用需求为牵引，促进产业上下游协同合作，构建密切合作、互利共赢的生态体系，共同推动太赫兹通信产业的成熟发展。

6 中国联通太赫兹通信愿景与推进计划

6.1 愿景目标

我们认为在未来 6G 通信中，太赫兹通信技术将与其他低频段网络融合组网，广泛应用于地面的各种无线超宽带通信场景，搭载卫星、无人机、飞艇等平台，做为无线中继设备，应用于空天地海多维度一体化通信，应用于从宏观到微观的多尺度通信，成为未来 6G 通信的重要支撑技术。



图 6.1 中国联通太赫兹通信发展愿景

太赫兹通信愿景的实现需要太赫兹通信各项关键技术的不断突破和进展、技术标准化和产业链的日趋成熟、太赫兹通信设备形态和技术要求逐步明确、应用场景的部署方案逐步成型，太赫兹通信技术的应用成熟落地。为达到上述目标，联通做为运营商，会从自身的产业角色出发，以应用需求为牵引，与产学研合作伙伴一起，积极构建太赫兹合作平台，凝聚太赫兹产业力量，打造太赫兹产业生态体系，共同推动太赫兹产业链的成熟。

6.2 推进计划及工作进展

根据目前太赫兹通信技术产业进展况，中国联通提出了太赫兹通信技术长期推进计划：一阶段时间节点为 2021 年，主要工作是与国内产业机构建立多种形

式的技术联合创新合作关系，成立太赫兹通信开放实验室，以此为基础建立太赫兹通信技术开放创新平台，跟进、参与和推动太赫兹通信技术发展；二阶段时间点为 2022-2023 年，目标是以应用需求为牵引，成型中国联通的太赫兹通信应用场景和技术需求，依托冬奥会，开展太赫兹通信典型场景示范应用的试点工作，推动太赫兹通信应用系统研发；三阶段时间点为 2023-2025 年，目标是实现太赫兹通信各项关键技术的突破发展，为太赫兹通信行业标准化做好准备，持续推动太赫兹通信技术产业发展。



图 6.2 中国联通太赫兹通信长期推进计划

联通计划在未来一两年内从关键技术研究、标准化推动以及产业交流合作三方面同时开展推进相关工作。



图 6.3 中国联通太赫兹通信推进工作方向

关键技术研究方面，亟待开展对太赫兹通信关键技术、应用场景规划和网络部署方案等方面的研究工作。该方向工作目标是聚焦关键技术方向，不断增强自主创新研发能力，形成相关太赫兹通信关键技术的核心专利与标准，为未来 6G 标准化做好技术储备和专利布局，提高太赫兹通信技术核心竞争力。联通已在太赫兹通信关键技术、应用场景等方向开展预先研究工作，并基于前期预研成果形成本白皮书的主要内容。后续将继续聚焦关键技术方向，进行太赫兹通信技术专

题的研究，结合产业应用方向布局关键技术专利。

标准化方面，需要紧抓未来三到六年的关键技术研究窗口期，为太赫兹通信技术标准化工作启动做好技术储备。联通积极参与了 ITU、IMT-2030、CCSA 等相关标准组织工作。并根据标准组织的研究进展情况，积极联合产业伙伴，牵头组织进行太赫兹关键技术、应用场景规划和网络部署等方面的标准立项，逐步成型中国联通的太赫兹通信企业标准，并引导和推动太赫兹通信技术行业标准和国际标准的制定。

产业合作交流方面，需要运营商积极跟踪产业链发展动态，由需求应用出发，与高校、科研院所、器件和设备厂商联合，推动产学研用结合，引导太赫兹通信产业链发展。联通在该方向已开始启动太赫兹通信应用愿景和技术需求研究，并与国内相关产学研机构和组织建立了长期的太赫兹通信技术创新研究战略合作关系，共同构建技术交流创新平台，以技术专利标准化合作和业务应用示范等多种形式开展技术合作，依托冬奥会典型应用场景推进太赫兹原型机系统研发和试点应用尝试，为未来太赫兹通信应用落地提供技术参考。

随着全球各区域 6G 研究计划的启动，国家已开始在政策支持和产业引导等方面逐步加大支持力度，进行倾向性布局，推动太赫兹通信等技术产业发展。中国联通作为运营商，会紧跟国家产业政策和发展布局，紧抓未来五到十年产业发展窗口期，在技术研究、行业标准化推动和产业交流合作三方面同时发力，保证中国联通未来 B5G/6G 网络的先进性。

7 总结与展望

未来社会和产业信息交互都会对通信网络提出更大带宽、更高速率、更加多样化的通信能力和业务需求，太赫兹拥有超大带宽资源，可以满足和适应未来通信更高速率和差异化业务应用的需求。尽管现阶段太赫兹通信的发展面临诸多技术挑战，但随着相关技术的不断突破和高频太赫兹器件产业的持续发展，太赫兹将凭借其丰富的频率带宽资源等天然优势，与其他低频段网络融合组网，广泛应用于多维度多尺度通信场景，做为未来 B5G/6G 通信的重要支撑技术，成为未来社会信息融合联接的重要组成部分。

本白皮书提出中国联通对于太赫兹通信的发展需求、技术特点、应用场景及关键技术方面的分析观点，向产业界阐述了中国联通的太赫兹通信发展愿景、推进计划及工作进展，为合作伙伴和产业界提供参考。

中国联通作为运营商，会紧跟国家产业政策和发展布局，紧抓未来五到十年产业发展窗口期，在技术研究、行业标准化推动和产业交流合作三方面同时发力，保证中国联通未来 B5G/6G 网络的先进性。同时我们诚挚的邀请所有电信设备厂商、IT 系统厂商、芯片厂家以及所有关注太赫兹的研究机构和高校共同参与到太赫兹通信的关键技术研究，标准化和应用试点推动工作中，共同推动太赫兹通信产业链健康发展，实现合作共赢。

参考文献

- [1] 6G Flagship University of Oulu. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence (6G research visions 1 September 2019)
- [2] 杨鸿儒, 李宏光. 太赫兹通信技术研究进展[J]. 应用光学, 2018, 39(1): 12-21.
- [3] Friis H T. A note on a simple transmission formula[J]. Proceedings of the IRE, 1946, 34(5): 254-256
- [4] P. Hillger, J. Grzyb, R. Jain and U. R. Pfeiffer, Terahertz Imaging and Sensing Applications with Silicon-Based Technologies[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 9, no. 1, pp. 1-19, Jan. 2019
- [5] Z Chen, X Y Ma, B Zhang, et al., A Survey on Terahertz Communications[J]. China Communications, 2019,2.
- [6] B. Peng, T. Kurner, A stochastic channel model for future wireless THz data centers[C]. Proc. International Symposium on Wireless Communication Systems, 2015: 741-745.
- [7] J. Y. Shin, E. G. Sirer, H. Weatherspoon, D. Kirovski, On the feasibility of completely wireless data centers[J]. IEEE ACM Transactions on Networking, 2013, 21(5): 1666-1679.
- [8] S. A. Mamun, S. G. Umamaheswaran, A. Ganguly, et al., Performance Evaluation of a Power-Efficient and Robust 60GHz Wireless Server-to-Server Datacenter Network[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018.
- [9] S. G. Umamaheswaran, S. A. Mamun, A. Ganguly, Reducing Power Consumption of Datacenter Networks with 60GHz Wireless Server-to-Server Links[C]. Proc. Global Communications Conference, 2017: 1-7
- [10] IEEE Std 802.15.3d-2017, IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks— Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer[S], Approved 28 September 2017, IEEE-SA Standards Board.
- [11] 彭琳, 段亚娟, 别亚楠. B5G 毫米波和太赫兹技术的背景、应用和挑战[J]. 中兴通讯技术, 2019. 25(3) :82-86.
- [12] J. M. Jornet, I. F. Akyildiz. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks[J]. IEEE JSAC, Special Issue on Emerging Technologies for Communications, 2013 31(2): 685-694
- [13] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han. Terahertz band: Next frontier for wireless communications[J]. Physical Communication, 2014 12(4):16-32.
- [14] Y. Chen, and C. Han, Channel Modeling and Characterization for Wireless Networks-on-Chip Communications in the Millimeter Wave and Terahertz Bands[J]. IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications, 2019 5(1): 30-43.

- [15]L. Zakrajsek, E. Einarsson, N. Thawdar, M. Medley and J. M. Jornet, Design of Graphene-based Plasmonic Nano-antenna Arrays in the Presence of Mutual Coupling[C].in Proc. of EuCAP, 2017.
- [16]Liebe H J. MPM—An atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and millimeter waves, 1989, 10(6): 631-650.
- [17]AM Atmospheric Model, <https://www.cfa.harvard.edu/~spaine/am/>.
- [18]Attenuation due to Atmospheric Gases[S], ITU Rec. ITU-R P.676-10, ITU, Sept 2013
- [19]Specific Attenuation Model for rain for use in Prediction methods[S], ITU-R P. 838-3, ITU, Mar 2005
- [20]Schneider T, Wiatrek A, Preussler S, et al. Link budget analysis for terahertz fixed wireless links[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(2): 250-256.
- [21]王玉文. 太赫兹辐射大气传输特性研究与信道分析[D]. 中国工程物理研究院, 2017.
- [22]K Guan, B Peng, D. P He, et al., Measurement, Simulation, and Characterization of Train-to Infrastructure Inside-Station Channel at the Terahertz Band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(3): 291-306
- [23] Network 2030 - A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 And Beyond
- [24]Moeller L, Federici J, Su K. 2.5Gbit/s duobinary signalling with narrow bandwidth 0.625 terahertz source[J]. Electronics Letters, 2011, 47(15): 856-858
- [25]Thyagarajan S V, Kang S, Niknejad A M. A 240GHz wideband QPSK receiver in 65nm CMOS[C]. Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. USA: IEEE, 2014:357-360
- [26]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 & Technology, 2015, 5(5): 737-741
- [27] Thomas Kürner TU Braunschweig et al. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Speciality Networks: Introduction to the H2020 ICT-09-2017 cluster. May 2018.
- [28]Kallfass I, Antes J, Schneider T, et al. All active MMIC-Based wireless communication at 220 GHz[J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2): 477-487
- [29]Kallfass I, Antes J, Lope[-Dia[D, et al. Broadband Active integrated circuits for terahertz communication[C]. 2012 18th European Wireless. Poznan, Poland: [s. n.], 2012:1-5.
- [30]Antes J, König 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. Montreal, QC, Canada, 2012:1-3

- [31]Koenig S, Lope-DiazD, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. Nature Photonics, 2013,7(12): 977-981.
- [32]Song H J, Ajito K, Muramoto Y, et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications[J]. Electronics Letters, 2012,48(15): 953-954
- [33]Kosugi T, Hirata A, Nagatsuma T, et al.. MM-wave long-range wireless systems. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(2): 68-76.
- [34]Deng X J, Wang C, Lin C X, et al. Experimental research on 0.14 THz super high speed wireless communication system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(6): 1430-1432
- [35]Wang C, Lu B, Lin C X, et al. 0.34 THz Wireless link based on high order modulation for future wireless local area network[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(2): 75-85
- [36]Chen Z, Zhang B, Zhang Y, et al. 220 GHz outdoor wireless communication system based on a schottky-diode transceiver[J]. Leice Electronics Express, 2016, 13(9):1-9
- [37]Wang C, Lin C X, Deng X J, et al. 140 GHz data rate wireless communication technology research[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3): 263-267
- [38]Wang C, Lin C X, Chen Q, et al. A 10 Gbit/s Wireless communication link using 16QAM modulation in 140 GHz band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013,61(7): 2737-2746
- [39]Lin C X, Lu B, Wang C, et al. 0.34 THz wireless local area network demonstration system based on 802.11 protocol[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1): 12-15
- [40]Tan Z, Chen Z, Cao J, et al. Wireless terahertz light transmission based on digitally-modulated terahertz quantum Cascade Laser[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 031403
- [41] Yao J Q, Chi N, Yang P F, et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(9): 2213-2233.
- [42]姚建铨 钟凯 徐德刚. 太赫兹空间应用研究与展望[J]. 空间电子技术 2013 10 2 : 1-16
- [43]姚建铨 迟楠 杨鹏飞 等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光 2009 36 9 : 2213-2233
- [44]张健, 邓贤进, 王成, 等. 太赫兹高速无线通信: 体制、技术与验证系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1):1-13
- [45]陈智, 张雅鑫, 李少谦. 发展中国太赫兹高速通信技术与应用的思考[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(3): 43-47

创泽智能机器人集团主要产品



智能服务机器人



智能陪护机器人



安防巡检机器人



消毒机器人



智能党建机器人



智能教育机器人



智能导诊机器人



银行智能机器人



室外智能消毒机器人



多功能消毒机器人



全自动智能消毒杀菌机器人



智能医用消毒机器人



了解更多登录官网
www.chuangze.cn