

文章编号: 2095-4980(2022)02-0159-07

6G 新频谱: 太赫兹无线通信之“思与行”

邓贤进^{a,b}, 姚 军^b, 林长星^{a,b}, 岳海昆^{a,b}, 杨 昊^{a,b}, 吴秋宇^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 太赫兹无线通信技术是未来 6G 潜在关键技术之一, 引起了国内外广泛的关注。本文首先介绍了国内外相关研究计划和研究动向, 分析了太赫兹通信技术的特点和优势。其次阐述了太赫兹通信技术在未来 6G 中的可能应用场景以及面临的挑战。最后提出了行动建议。

关键词: 6G; 太赫兹; 无线通信

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021309

New spectrum for 6G: thinking and action of terahertz wireless communication

DENG Xianjin^{a,b}, YAO Jun^b, LIN Changxing^{a,b}, YUE Haikun^{a,b}, YANG Hao^{a,b}, WU Qiuyu^{a,b}

(a.Microsystem and Terahertz Research Center, Chengdu Sichuan 610200, China;

b.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Terahertz (THz) wireless communication technology is one of the potential key technologies of the future 6G. It has aroused extensive attention at home and abroad. Firstly, the research plans and trends of 6G are introduced, and the features and advantages of THz wireless communication are reviewed. Then prospective scenarios as well as challenges of THz wireless communication applied in the future 6G are described. At last, action proposal towards 6G is suggested.

Keywords: 6G; terahertz; wireless communication

随着全球首份 6G 白皮书的发布, 近数年来 6G 成为国内外关注的热点。作为 6G 愿景的关键技术, 太赫兹无线通信技术已得到全球无线通信业认可。美国、日本、欧盟、中国等政府或政府部门, 国际组织如国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)、电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)等, 产业界如华为、中兴、三星、诺基亚、NTT 等, 学术界如芬兰奥卢大学(University of Oulu)、美国纽约大学(New York University)、我国东南大学等, 都先后投入到 6G 的探讨与研究之中。

美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于 2018 年参与资助成立了太赫兹与感知融合技术研究中心(Center for Converged Terahertz Communications and Sensing), 联合纽约大学、加利福尼亚大学圣芭芭拉分校等多家研究机构, 重点关注基于太赫兹频段的 6G 技术^[1-2]。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)于 2019 年正式启动 95 GHz~3 THz 频率范围的太赫兹频谱新服务研究工作, 开始发放为期 10 年、可销售网络服务的试验频谱许可^[3]。美国 Keysight 公司、Formfactor 公司也在 2020 年发布了针对 6G 太赫兹频段研究的测试解决方案^[4-5]。

欧盟于 2017 年启动了为期三年的 beyond-5G 的太赫兹无线通信研究计划 Terranova^[6]。在 2020 年, 在地平线 2020 计划(Horizon 2020 projects)中支持了多个太赫兹无线通信项目^[7], 其中一个是由诺基亚牵头的 6G 关键技术研究 Hera-X 计划^[8]。2019 年 9 月, 芬兰奥卢大学发布的白皮书中将太赫兹频段列为 6G 宽带无线通信连接的唯一候选, 发布的 6G 白皮书“KEY DRIVERS AND RESEARCH CHALLENGES FOR 6G UBIQUITOUS WIRELESS INTELLIGENCE”在 14 个 6G 潜在无线技术方向中有 6 个涉及到太赫兹^[9]。

在 2020 年, 日本计划投资 500 亿日元用于 6G 关键技术的研究^[10], 其代表性研究机构 NTT DOCOMO 发布的白皮书“5G Evolution and 6G”中将太赫兹无线通信技术列为关键技术之一^[11]。韩国三星在 2020 年 7 月发布的白

皮书“6G the next hyper connected Experience for All”中将太赫兹无线通信技术列为有相当前景的关键技术之一^[12]。

2019年11月,科技部会同发改委、教育部、工信部、中科院等召开6G技术研发工作启动会,标志着我国6G技术研发工作正式启动^[13]。2020年,中国联通面向6G的“中国联通太赫兹通信技术”白皮书^[14]、赛迪研究院的“6G无线热点技术研究”白皮书^[15]、广东省新一代通信与网络创新研究院的“6G无线热点技术研究”白皮书^[16]中均把太赫兹无线通信技术列为6G的关键技术之一。此外,中兴通讯也将太赫兹无线通信技术列为6G关键技术之一^[17]。

在国际组织方面,2019年世界无线电通信大会(WRC-19)批准了275 GHz~296 GHz、306 GHz~313 GHz、318 GHz~333 GHz和356 GHz~450 GHz频段共137 GHz带宽资源可无限制条件地用于固定和陆地移动业务应用^[18]。2020年,ITU正式启动了6G研究工作^[19-20],IEEE批准了第一个面向6G的太赫兹无线通信标准IEEE 802.15.3d^[21]。

然而,要在6G中得到成功应用,首先需对太赫兹通信技术有全面的思考和认识,包括:太赫兹通信技术特点和独特优势是什么?太赫兹通信技术在未来6G中的作用和具体应用是什么?当前太赫兹通信技术究竟面临哪些挑战?在此基础上,下一步该如何行动?

1 太赫兹通信技术特点和优势

与传统微波无线传输系统相比:一是传输速率高、信息传输容量大。太赫兹无线传输系统由于载波频率高,可利用的物理带宽宽,因此其传输容量大。比微波无线传输系统高出1~4个数量级,可轻易实现10 Gbps以上的无线传输速率,比当前的超宽带技术快几百甚至上千倍。二是抗干扰性和保密性好。太赫兹频段可利用的物理带宽宽,加之大气的严重衰减特性以及良好的波束定向性,因此具有良好的保密性能。三是可有效解决电磁兼容和频谱资源紧张等问题。太赫兹频段与传统微波频段频率相差较远,具有良好的电磁兼容性能。四是可以有效地穿透等离子体。太赫兹无线传输系统具有高的载波频率,可有效地穿透等离子体,克服“黑障”对传输性能的影响。

与激光无线传输系统相比:一是波束适中,自动跟瞄简单,对平台稳定度要求低,系统传输可靠性(稳定性)好。太赫兹无线传输系统发射波束宽度一般在 0.1° ~ 10° ,而典型激光无线传输系统的发射角通常为1~10毫弧度,太赫兹无线传输系统发射波束宽度比典型激光无线传输系统的发射角宽几个数量级,因此,自动跟瞄容易,对平台稳定度要求低,无线传输系统可靠性(稳定性)好。二是体积小,质量轻,易于集成,特别适合空间应用。太赫兹频段本身波长短,物理特征尺寸小,加之跟瞄系统简单,因此,系统体积小,质量轻,特别适合空间应用。三是对烟雾、灰尘、云层穿透能力强。太赫兹无线传输系统对烟雾、灰尘、云层具有比光更强的穿透能力,受天气和气候变化的影响小。例如,西班牙OGS地面站与ARTEMIS卫星上的光无线传输系统实验中,链路成功率仅47%,16%失败由于云,22%失败由于捕获^[22]。在大气湍流引起的闪烁效应方面,光比太赫兹更敏感,这是由于太赫兹波与光的路径改变相当,但闪烁效应与波长成反比。在云雾尘引起的散射方面,光比太赫兹波更强,这是由于特征尺寸接近光的波长。另外,研究表明,强粉尘下,625 GHz波的衰减远小于 $1.5\ \mu\text{m}$ (近2个量级),晴空湍流实验中太赫兹波衰减比红外低2个量级,而20%~30%云(含水汽)条件下 $90\ \text{th}\% < 3\ \text{dB}@300\ \text{GHz}$ ^[23]。在雨衰方面,太赫兹波大于光,这是由于雨滴特征尺寸接近太赫兹波,但是大雨情况的概率低(特别是低PWV地区),例如日本一年99.9%的雨衰小于 $4\ \text{dB}@120\ \text{GHz}$ ^[24]。四是太赫兹无线传输系统容量可与光纤无线传输系统媲美。太赫兹频段拥有足够宽的带宽,理论上可以达到Tbps量级的无线传输系统速率,可与光纤无线传输系统媲美。

2 太赫兹通信技术在未来6G中的可能应用

2.1 6G网络架构与发展趋势

6G将是万物智联的、全覆盖的、全维度的、全融合的、全智能的,为万物提供情景感知的智能服务,将人文社会与外部物理世界紧密连接,利用AI赋能满足人的精神与物质的全方位需求。相比于5G的“信息随心至,万物触手及”,6G将会更进一步,关键参数的对比如表1所示^[25-26]。未来6G网络将会构建跨空域、跨地域、跨海域的空天海地一体化网络,将深空、天基、空基、陆基、海基的自然空间“超级连接”^[17],扩展通信覆盖广度和深度,为未来各种用户需求提供信息保障。

表 1 5G 和 6G 关键指标的对比

Table 1 Comparison of key performance requirements between 5G and 6G

characteristic	operating frequency	experienced data rate	peak data rate	connection density	air latency
5G	3-300 GHz	0.1 Gb/s	20 Gb/s	10 ⁶ Devices/km ²	1 ms
6G	up to 1 THz	1 Gb/s	1 Tb/s	10 ⁷ Devices/km ²	0.1 ms

未来 6G 时代网络将由全息交互、共享算力和人机协同孵化出全新的服务，进一步扩展至感知互联网、AI 服务网和行业服务互联网，呈现出万物智联改变世界的愿景，顺应人性化、全息交互和群体协作的发展趋势^[27]。感知互联网侧重于感知全息实时共享，AI 服务互联网侧重于泛在智能，行业服务互联网侧重于人机或机器之间的协作自动^[27]。

2.2 6G 太赫兹通信潜在的典型应用场景

支持超大带宽容量和超高传输速率是太赫兹无线通信最为显著的技术特征和优势，从空间应用到地面应用，从宏观尺度到微观尺度，可以提供多维尺度通信。典型应用场景如下：

1) 空间高速信息传输骨干网

面对未来 6G 网络的“天地互联”，空间高速信息传输网络将发挥着重要作用。由于受轨道资源和频谱资源的限制，传统的信息传输手段将面临严峻挑战。太赫兹高速通信技术作为一种新型通信技术，特别适合空间环境应用，有望在未来空间高速信息传输网络中发挥重要作用，应用于星地、星间、空地等高速传输骨干网络中，从根本上解决我国空间信息传输网络中的高速信息传输技术难题，向上和向下扩展人类的科学、文化活动空间及人类的生产活动范围，为空间信息服务能力的大幅提升提供有力支撑。

2) 地面高速无线传输网络

地面高速无线传输网络也是未来 6G 网络“天地互联”的重要组成部分。太赫兹高速通信技术将有力支撑未来 6G 高速网络地面应用，在解决“最后一公里”的高速无线接入、高速无线局域网/个域网、通信网中的高速无线数据回程、无线多媒体业务、热点地区超宽带覆盖、数据中心短距无线连接以及无线感知与信息交互等方面发挥重要作用。

3) 微观尺度通信

面对未来 6G 网络“万物智联”，太赫兹无线通信在宏观尺度应用之外，还可以在微尺度通信应用方面发挥重要的作用。典型应用场景包括片上/片间通信、无线纳米传感器网等，支持健康监测系统和可穿戴或植入式太赫兹设备^[28]。用于纳米体域网、纳米传感器网络等，实现微观通信的 6G 网络覆盖^[29]。

3 太赫兹通信技术面临的挑战

3.1 体制与架构

从技术实现来看，典型的太赫兹无线通信系统架构可以分为两种：全电子技术方式和光电混合技术方式，如图 1 所示^[30]。全电子技术方式通常是利用固态器件特别是肖特基混频二极管、肖特基检波二极管或单片微波集成电路/太赫兹单片集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit/Terahertz Monolithic Integrated Circuit, MMIC/TMIC)芯片实现信号的调制及解调，如图 1(a)所示，接收端可以采用直接检波接收或外差相干接收两种形式。光电混合技术方式通常是将信息通过电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)、电吸收调制器(Electro Absorption Modulator, EAM)等器件调制到光波段上，然后利用光电转换器件将光频段信号转换为太赫兹信号，进行发射。接收端通常采用与全电子技术方式完全相同的接收架构，可以是直接检波接收或外差相干接收，如图 1(b)所示。

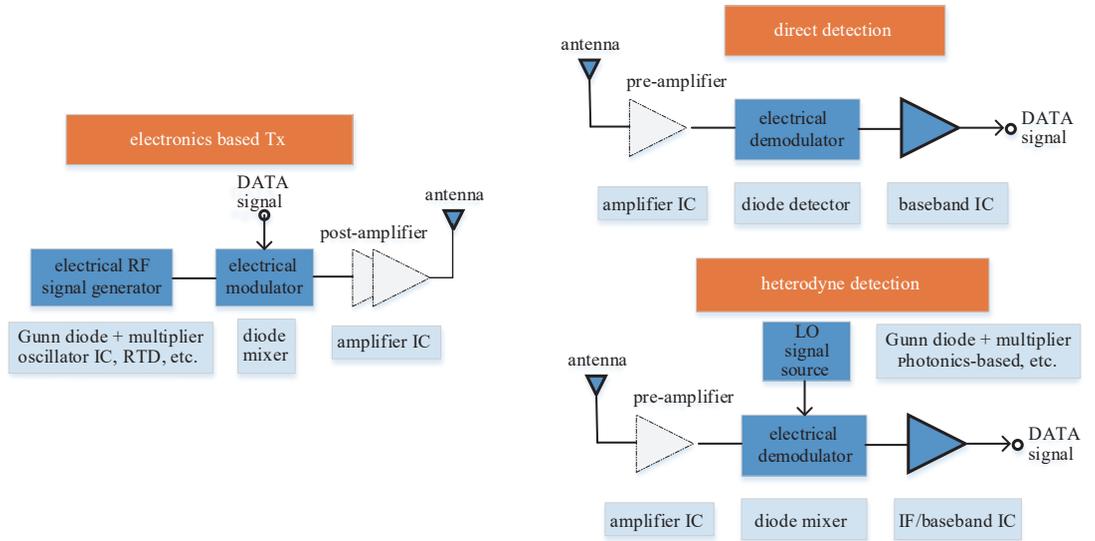
作为太赫兹高速通信系统，无论是光电混合技术方式还是全电子技术方式，需重点关注信号处理组合方式，主要包括信号调制方式、信号解调实时性以及信号是否复用等。

1) 信号调制：典型的信号调制有幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK)/开关键控(On-Off Keying, OOK)调制和高阶数字调制。ASK/OOK 调制实现相对简单，体积功耗小，结构紧凑，且容易实现高速率，但频谱效率较低，所占用的信号带宽宽，难以与其他功率器件级联实现大功率输出，因此适合近距离高速通信应用。高阶数字调制结合了数字信号处理技术，抗信道失真能力强，频谱效率高，占用信号带宽窄，易于与其他功率器件级联实现大功率输出，因此适合中远距离通信应用，但由于现有数字器件水平的限制，不易于实现高速率。

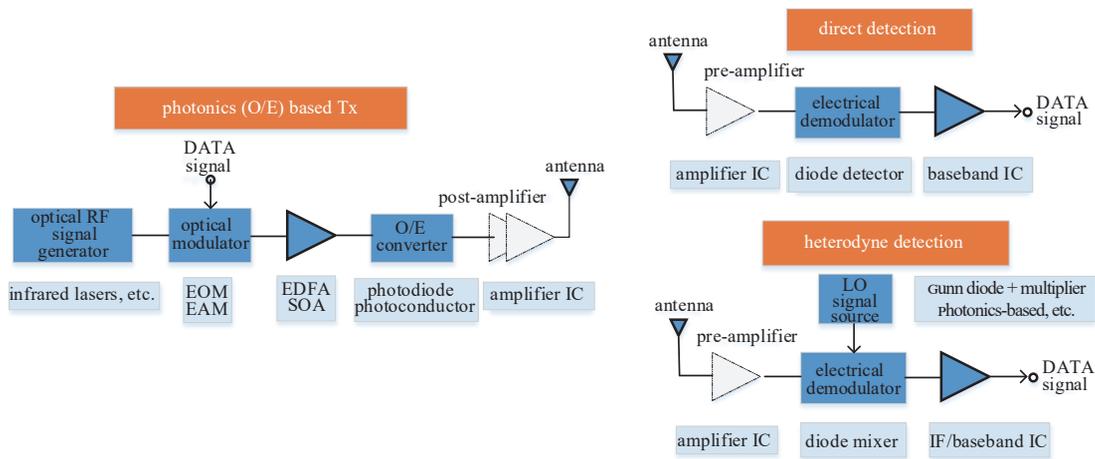
2) 信号解调实时性：信号解调有实时解调和非实时解调(事后处理)。对于实际应用的通信系统，一般都要求信号实时解调。但由于受高速数字器件水平等限制，目前国内外部分研究系统采用事后解调处理的方式，实现高速传输，由此来验证系统传输能力。

3) 信号是否复用：信号非复用是指基于单通道信号或单载波信号来实现系统通信。信号复用是在单通道信

号或单载波信号通信能力的基础上，通过频分复用、空分复用、极化复用等方式来提升整个系统的通信能力。由此可以看出非复用信号通信能力是信号复用通信能力提升的基础。



(a) Transceiver architecture of terahertz high speed wireless communication system based on all electronics



(b) Transceiver architecture of terahertz high speed wireless communication system based on photoelectric hybrid

Fig.1 Architecture of typical terahertz wireless communication system

图 1 典型的太赫兹无线通信系统架构

因此，无论是基于光电混合技术方式，还是基于全电子技术方式，要实现高速无线通信，均可以通过几种不同的信号处理组合方式来实现。如图 2 所示，可以形成基于全电子学的 ASK/OOK 实时复用、ASK/OOK 非实时复用、ASK/OOK 实时非复用、ASK/OOK 非实时非复用，高阶数字实时复用、高阶数字非实时复用、高阶数字实时非复用、高阶数字非实时非复用，或者基于光电混合的 ASK/OOK 实时复用、ASK/OOK 非实时复用、ASK/OOK 实时非复用、ASK/OOK 非实时非复用，高阶数字实时复用、高阶数字非实时复用、高阶数字实时非复用、高阶数字非实时非复用。

以上分析了两种典型体制各自的优势，光电混合技术方式的太赫兹通信系统易于实现 100 Gbps 以上高速率，而全电子技术方式的太赫兹通信系统易于集成和实现小型化。针对未来 6G 不同应用场景，针对性地选择技术体制与架构，还有待进一步研究。

3.2 高精度太赫兹信道模型

目前太赫兹通信的信道研究以室内近距离为主，几乎没有室外长时间远距离(>1 km)的实测数据及其信号模

型，针对精确信道模型的太赫兹通信组网也缺少公开的资料报道。

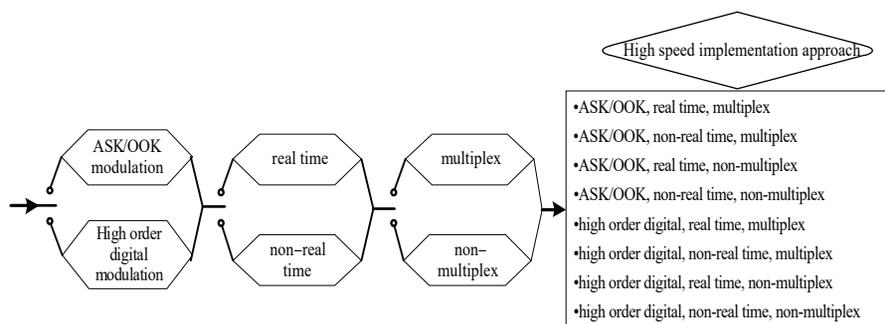


Fig.2 Different types of terahertz high speed wireless communication systems

图2 不同类型的太赫兹高速无线通信系统

远距离太赫兹传播对气候变化、空气成分变化、障碍物微弱运动、多径传输更为敏感。然而，现有的信道预测方程基于 ITU(3GPP)RMa 公式，是对低频实测数据的简单延伸，现在该方程暂无高频段(比如 140 GHz、220 GHz 及以上)长距离实测数据的佐证^[31]。空间的气体成分变化对太赫兹信道的影响，也几乎没有公开文献，然而这却是星地通信、星球间通信的基础。近两年来，国内的中国工程物理研究院电子工程研究所、上海交通大学^[29]、电子科技大学^[32]、东南大学^[33]等已经着手启动了相关的研究工作。

综上所述，高精度太赫兹信道模型现在尚属研究空白，是面向 6G 太赫兹无线通信的挑战之一。

3.3 高效高功率太赫兹源

从未来应用角度看源的功率，空间远距离通信应用需要连续波功率大致在 10 W~100 W 之间。当前在 1 THz 及以上频段，几乎所有源(光学、电子学)，连续波功率都小于 1 W，更准确地说是在 10^{-6} ~1 W 之间；在 1 THz 以下频段，对于单片集成电路和晶体管功率器件，在 100~200 GHz 频段为百毫瓦量级，300 GHz 频段为十毫瓦量级，650 GHz 频段为毫瓦量级；对电真空功率器件，在 100~200 GHz 频段为十瓦量级，300 GHz 频段为百毫瓦量级；对量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)，在 4.4 THz、10 K 条件下，连续波功率为十毫瓦量级。由此可以看出，当前太赫兹源的技术水平与实际应用需求尚有不小的差距^[34]。

从未来应用角度看源的效率，光-波或波-波转换效率小于 1%，插头效率小于 0.1%，实际效率在 10^{-6} ~ 10^{-3} ，处在一个极低的水平，难以实现工程应用。

从未来应用角度看功率比(指的是单位质量或单位体积的功率值)，实际应用需求大致为 1 W/kg，而目前实际情况是小于 1 mW/kg，QCL 要好一些，但算上致冷装置和电源也差不多处于同一水平。

从过去十年来太赫兹功率器件的发展进程来看，单片集成电路和晶体管功率器件的平均功率每 5 年攀升 5~8 倍，电真空器件平均功率每 5 年上升两个数量级，QCL 平均功率每 5 年攀升 2~5 倍，按照这种发展速度，实现太赫兹源在未来 6G 通信中的真正应用还需时日。

3.4 太赫兹天线及快速跟瞄

目前大多数太赫兹通信原型系统采用机械伺服和喇叭、抛物面天线，这种形式天线系统体积较大，跟瞄速度较慢，不适合高速移动场景下通信。因此，需要研究新型超大规模阵列集成天线，这将不可避免地需解决太赫兹频段低损耗互连、高密度三维集成、通道间的幅相误差、互耦误差等挑战性问题。

3.5 高速调制解调技术

针对未来 6G 应用，可能需要 100 Gbps 以上传输速率。超大带宽数模转换和高速基带处理算法将面临严峻挑战，超大带宽数模转换需要解决超高速 ADC 和 DAC 芯片实现问题，高速基带处理算法需要解决高速并行核心算法问题，包括并行同步、滤波、LDPC 编译码、均衡、调制以及超宽带数字预失真技术等。

4 行动建议

作为 6G 愿景的关键技术，太赫兹无线通信技术有望在天地一体化信息网络、万物智联中发挥重要作用，成为未来 6G 的重要支撑技术之一。然而现阶段，存在的主要问题：一是具体应用需求不清楚，目前仅仅停留在宏观判断层面。什么是 6G？未来 6G 是什么形态？目前均处于研判中。二是研究与实际应用需求脱节，缺乏明确

的针对性问题, 技术应用难以落地, 长期停留在实验室阶段。同时, 系统应用对核心单元技术的牵引不够明确, 研究重点分散, 不能形成有效合力。三是对太赫兹波的认识还不够深入, 基础研究薄弱。四是关键技术并未完全突破, 还不能满足系统应用需求。

针对上述问题, 提出如下行动建议: 一是以基础研究为前提。太赫兹波是介于毫米波与红外光之间的电磁波, 传统的基于电磁场理论和基于量子理论都遇到了瓶颈问题, 因此, 在基础理论上可能需要把量子理论和电磁理论结合起来, 解释太赫兹波的产生、检测、传播以及同物质相互作用的机理, 以及把电子学、光子学、光电子学结合起来, 实现太赫兹波的产生、放大、传输、检测和变换等。二是以关键技术为突破点。目前太赫兹技术发展水平相对不成熟, 还主要处于基础研究和关键技术突破阶段, 还不可能形成大规模的应用。因此, 当前研究必须以关键技术为突破点。三是以技术验证为手段。如何验证我们在基础研究和关键技术攻关取得的成果, 选择具有代表性的太赫兹应用系统研究, 并进行技术验证实验是一个较好的办法。四是需要学术界、产业界和政府机构的共同努力, 形成良好的太赫兹生态系统, 共同推进未来 6G 信息网络构建, 促进太赫兹通信技术产业化发展。建议高校、研究机构等学术界以突破关键瓶颈技术、提升加工工艺水平为重点, 形成自主可控核心器件与系统研发能力, 构建太赫兹通信技术协同研发平台。建议产业界积极跟踪产业链发展动态, 搭建面向 6G 的太赫兹通信应用场景, 牵引技术发展。建议政府机构加大政策支持力度和产业引导, 进行前瞻性、倾向性布局, 推动太赫兹通信技术产业发展。相信随着技术的不断突破和产业化的持续发展, 太赫兹通信技术将是 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。

参考文献:

- [1] All eyes on 6G: NYU tandon wins spot in DARPA consortium to jumpstart wireless innovation[EB/OL]. (2018-05-09). <https://engineering.nyu.edu/news/all-eyes-6g-nyu-tandon-wins-spot-darpa-consortium-jumpstart-wireless-innovation>.
- [2] All eyes on 6G[EB/OL]. (2018-05-09). <https://comsenter.engr.ucsb.edu/news/all-eyes-6g>.
- [3] FCC takes steps to open spectrum horizons for new services and technologies[EB/OL]. (2019-11-17). <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-356588A1.pdf>.
- [4] A new sub-terahertz testbed for 6G research[EB/OL]. (2020-4-14). <https://www.keysight.com/cn/zh/assets/7120-1082/white-papers/A-New-Sub-Terahertz-Testbed-for-6G-Research.pdf>.
- [5] JEFFREY Hesler. The advancement of THz test & measurement equipment for 5G, 6G and Beyond[EB/OL]. (2020-11-17). <https://compass.formfactor.com/wp-content/uploads/2020-Jeffrey-Hesler-The-Advancement-of-THz-Test-Measurement-Equipment-for-5G-6G-and-Beyond.pdf>.
- [6] Terranova Project[EB/OL]. (2017-07-01). <https://ict-terranova.eu/>.
- [7] EU has granted over 95 million in funding for 6G research[EB/OL]. (2021-04-05). <https://www.6gworld.com/exclusives/eu-has-granted-over-e95-million-in-funding-for-6g-research/>
- [8] Nokia to lead the EU's 6G project Hexa-X[EB/OL]. (2020-12-07). <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/12/07/nokia-to-lead-the-eus-6g-project-hexa-x/>
- [9] Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[EB/OL]. (2019-09). <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf>.
- [10] The race towards 6G[EB/OL]. (2021-02-18). <https://www.nasdaq.com/articles/the-race-towards-6g-2021-02-18>.
- [11] 5G evolution and 6G[EB/OL]. (2020-01). https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_20200124.pdf.
- [12] The next hyper-connected experience for all[EB/OL]. (2020-07-14). <https://news.samsung.com/uk/samsungs-6g-white-paper-lays-out-the-companys-vision-for-the-next-generation-of-communications-technology>.
- [13] China officially launched the research and development of the sixth generation mobile communication technology[EB/OL]. (2019-11-06). http://www.most.gov.cn/kjbgz/201911/t20191106_149813.html.
- [14] 中国联通网络技术研究院. 中国联通太赫兹通信技术白皮书[Z]. 2020. (China Unicom Network Technology Research Academy. China Unicom terahertz communication technology white paper[Z]. 2020.)
- [15] 赛迪智库无线电所. 6G 概念及愿景白皮书[Z]. 2020. (CCID think tank radio Institute. 6G concept and vision white paper[Z]. 2020.)
- [16] 广东省新一代通信与网络创新研究院, 清华大学, 北京邮电大学, 等. 6G 无线热点技术研究白皮书[Z]. 2020. (Guangdong new generation communication and Network Innovation Research Academy, Tsinghua University, Beijing University of Posts and Telecommunications, et al. 6G wireless hotspot technology research white paper[Z]. 2020.)

- [17] 赵亚军,郁光辉,徐汉青. 6G 移动通信网络:愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学 F 辑, 2019, 49(8):963–987. (ZHAO Yajun, YU Guanghui, XU Hanqing. 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies[J]. Chinese Science Series F, 2019, 49(8):963–987.)
- [18] The world radiocommunication conference defined the available frequencies of fixed and mobile radio services in terahertz band above 275 GHz for the first time[EB/OL]. (2019–11–25). https://www.miit.gov.cn/ztlz/rdzt/2019sjwxdtxdh/ywkb/art/2020/art_b3f616e1919c4aef97e696f89d8603c6.html.
- [19] ITU launches 6G research[EB/OL]. (2020–03–03). <https://mp.weixin.qq.com/s/vUDBxMIRTzrZrROX03eleQ>.
- [20] ITU-R:future technology trends for the evolution of IMT towards 2030 and beyond(including 6G)[EB/OL]. (2020–10–16). <https://techblog.comsoc.org/2020/10/16/itu-r-future-technology-trends-for-the-evolution-of-imt-towards-2030-and-beyond-including-6g/>
- [21] PETROV V, THOMAS K ü rner, HOSAKO A I. IEEE 802.15.3d: first standardization efforts for sub-terahertz band communications towards 6G[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11):28–33.
- [22] TOYOSHIMA M, YAMAKAWA S, YAMAWAKI T, et al. Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2005, 53(2):842–850.
- [23] SU K, MOELLER L, BARAT R B, et al. Experimental comparison of terahertz and infrared data signal attenuation in dust clouds[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2012, 29(11).
- [24] HIRATA A, YAMAGUCHI R, TAKAHASHI H, et al. Effect of rain attenuation for a 10-Gb/s 120-GHz-band millimeter-wave wireless link[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2009, 57(12):3099–3105.
- [25] ELMEADAWY S, SHUBAIR R M. 6G wireless communications: future technologies and research challenges[C]// The 2019 IEEE International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA 2019). IEEE, 2019.
- [26] ZHANG Z, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019(99):1–14.
- [27] 方敏,段向阳,胡留军. 6G 技术挑战、创新与展望[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(3):61–70. (FANG Min, DUAN Xiangyang, HU Liu jun. 6G technology challenge, innovation and prospect[J]. ZTE Technology, 2020, 26(3):61–70.)
- [28] AKYILDIZ I F, JORNET J M, HAN C. Terahertz band: next frontier for wireless communications[J]. Physical Communication, 2014, 12(4):16–32.
- [29] CHEN Y, HAN C. 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, 2020, 5(1):30–43.
- [30] SONG H J, NAGATSUMA T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1):256–263.
- [31] MACCARTNEY G R, RAPPAPORT T S. Study on 3GPP rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications[C]// ICC 2017–2017 IEEE International Conference on Communications. Qingdao, China: IEEE, 2017.
- [32] 谢莎,李浩然,李玲香,等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学报, 2020, 41(5):172–190. (XIE Sha, LI Haoran, LI Lingxiang, et al. Overview of terahertz communication technology[J]. Journal of Communication, 2020, 41(5):172–190.)
- [33] 王承祥,黄杰,王海明,等. 面向 6G 的无线通信信道特性分析与建模[J]. 物联网学报, 2020, 4(1):19–32. (WANG Chengxiang, HUANG Jie, WANG Haiming, et al. Characteristic analysis and modeling of 6G oriented wireless communication channel[J]. Journal of Internet of Things, 2020, 4(1):19–32.)
- [34] SUEN J Y, FANG M T, DENNY S P, et al. Modeling of terabit geostationary terahertz satellite links from globally dry locations[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2017, 5(2):299–313.

作者简介:

邓贤进(1973–), 男, 四川省安岳县人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹科学技术 .email:dengxianjin_mtrc@caep.cn.

林长星(1986–), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹通信和高速信号处理.

杨昊(1991–), 男, 武汉市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹接收机与无源传输器件.

姚军(1962–), 男, 四川省广安市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为通信与信息系统.

岳海昆(1987–), 男, 河南省汝南县人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹集成微系统.

吴秋宇(1986–), 男, 广西壮族自治区桂林市人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹通信技术与无线通信信号处理.