

# 激光与光电子学进展

## 太赫兹波在 6G 通信网络中的研究进展

李丽<sup>1,2</sup>, 葛宏义<sup>1,2\*\*\*</sup>, 蒋玉英<sup>1,3\*\*</sup>, 李广明<sup>1,2</sup>, 吕明<sup>1,2</sup>, 王飞<sup>1,2</sup>, 张元<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南 郑州 450001;

<sup>2</sup>河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

<sup>3</sup>河南工业大学人工智能与大数据学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 随着第五代通信技术在世界范围内的商业部署,截至2021年5月,全球5G通信网络用户规模已超过4亿。为满足未来业务对超高数据速率、极低延迟等的需求,下一代无线通信技术的研究已经展开。其中,太赫兹频段中大量的绝对带宽资源是太赫兹频率进行无线通信最显著的优势,使得太赫兹通信具有极大的应用潜力。本文对太赫兹通信领域的相关研究进行了阐述,首先介绍了6G通信网络的规划与愿景和太赫兹通信技术国内外现状;其次讨论了太赫兹通信的关键技术及潜在应用场景;最后总结了目前的研究成果并对未来的研究方向进行展望,为迈进“太赫兹时代”提供新的思路。

**关键词** 光通信; 6G通信网络; 太赫兹通信技术; 太赫兹波; 万物互联

中图分类号 E963

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1300007

### Research Progress of Terahertz Wave in 6G Communication Network

Li Li<sup>1,2</sup>, Ge Hongyi<sup>1,2\*\*\*</sup>, Jiang Yuying<sup>1,3\*\*</sup>, Li Guangming<sup>1,2</sup>, Lü Ming<sup>1,2</sup>, Wang Fei<sup>1,2</sup>,  
Zhang Yuan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Grain Information Processing and Control, Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China;

<sup>2</sup>College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China;

<sup>3</sup>School of Artificial Intelligence and Big Data, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China

**Abstract** The global 5G communication network subscriber base has surpassed 400 million as of May 2021, thanks to the commercial deployment of 5G communication technologies around the world. Research on the next-generation wireless communication technologies has been conducted to address the demand for ultrahigh data rates and ultralow latency for future applications. The large number of absolute bandwidth resources in the terahertz band is the most significant advantage of the terahertz communication, making it suitable for various applications. Herein, the relevant research in the field of terahertz communication is described. First, we introduce the plan and vision of 6G communication network, as well as the current status of the terahertz communication technology on a domestic and worldwide scale. Second, the key terahertz communication technology and potential application scenarios are discussed. Finally, we present a summary of the current research results and an outlook on future research directions to provide new ideas for moving into the “terahertz era.”

**Key words** optical communications; 6G communication network; terahertz communication technology; terahertz wave; internet of everything

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61975053, 61705061)、河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室开放基金(KFJJ2020103)、河南省自然科学基金(202300410111)、河南省高校科技创新人才支持计划(22HASTIT017)、河南省重大公益项目(201300210100)

通信作者: \*zy\_haut@163.com; \*\*jiangyuying11@163.com; \*\*\*gehongyi2004@163.com

## 1 引 言

从 1980 年开始,大约每 10 年就会出现一代无线蜂窝通信<sup>[1-2]</sup>。2020 年 6 月,5G 通信网络(5G)在全球范围内标准化部署<sup>[3-4]</sup>。工业和信息化部预测 2023 年 5G 个人用户普及率将超过 40%,用户数超过 5.6 亿,这一数据表明用户对网络的需求在不断提高。国际电信联盟(ITU)曾预测全球每月移动数据流量[包括机对机(machine to machine, M2M)流量]将在 2025 年达到 607 EB(1 EB=10<sup>6</sup> TB),2030 年达到 5016 EB<sup>[5]</sup>。到 2030 年,全球每月移动数据流量大约提升 100 倍<sup>[6]</sup>。

2030 年以后,5G 技术将无法满足不同数据速率、极低延迟等需求<sup>[7]</sup>。5G 的局限性意味着必须提前准备下一代移动通信网络——6G 通信网络(6G)<sup>[8-10]</sup>。2017 年 9 月,欧盟开始研究太赫兹通信、可见光通信和超越 5G 的 D 波段无线电<sup>[6]</sup>,为 6G 做了初步准备工作。2018 年 3 月,我国工信部部长表示已着手研究 6G<sup>[11]</sup>,其中,太赫兹无线通信技术与系统是主要研究内容之一。2018 年 9 月,美国联邦通信委员会(FCC)决定向 6G 开放太赫兹频谱<sup>[12-15]</sup>。2019 年 4 月,韩国将研究和开发 100 GHz 以上的超高频无线设备列为“首要”课题。2019 年,英国布朗大学已经实现了非直视太赫兹数据链路传输<sup>[16]</sup>。截至 2020 年,日本已在太赫兹系统与核心器件研发方面取得重大成果<sup>[17-18]</sup>。可见,进一步利用高频频谱是无线通信研究人员的共识,太赫兹频段是国际上备受期待的下一代高速无线通信的关键。

6G 将促进物联网发展,它将利用与更成熟的 5G 相同的优势,正是这种对 5G 的依赖,使得早期的 6G 研究对于网络技术的未来如此重要。6G 将实现“万物智联、数字孪生”的美好愿景<sup>[19-20]</sup>。基于互联网连接,6G 提供万物互联,建成集“海-陆-空-天”一体的全维度网络,提供接近 100% 的地理覆盖率。6G 所提供的数据速率、网络容量、安全性等性能将有更大进步。文献[7]给出了 6G 的一些关键指标,6G 多数关键指标相比 5G 提升了 10~100 倍<sup>[21]</sup>。

太赫兹波是无线电频谱的最后一个过渡,被称为“THz gap”,结合了毫米波通信和光通信的优点。传输全息视频、无人机的连续高清晰视频流等需要大量数据的应用场景所需的频谱带宽在毫米波的频段<sup>[22-25]</sup>是不可用的,对区域或空间频谱效率以及连接所需的频谱波段提出了挑战<sup>[5]</sup>。太赫兹通信具有宽带宽和短波长的特点,大量天线元件可集成在一个单位面积上,从而满足密集网络覆盖的需要。太赫兹波的窄波束和高指向性可以实现更好的保密性以及抗干扰和抗拦截能力<sup>[26]</sup>。通信速率高、方向性好、安全性高、频谱资源丰富等是太赫兹通信突出的特点,在未来的移动通信中是一种具有极大优势的宽带无线接入技术<sup>[27]</sup>。

本文讨论了太赫兹通信在 6G 中的关键技术,介绍

了太赫兹通信 3 大潜在应用场景,并总结了未来太赫兹通信的研究方向和开放性研究问题。

## 2 太赫兹通信关键技术

太赫兹通信虽然具有明显的优势,发展前景广阔,但也面临诸多问题和挑战,如信号质量、系统灵活性等,亟须新策略和方案的创新发展以迎接上述挑战。本节主要从太赫兹器件及模块、信道建模以及空口技术 3 个方面介绍太赫兹通信关键技术与挑战。

### 2.1 太赫兹通信关键器件及模块

#### 2.1.1 太赫兹关键器件

太赫兹关键器件/芯片/组件的研发能力是当前太赫兹通信技术最重要的核心技术,也是太赫兹通信应用面临的巨大挑战<sup>[28]</sup>。太赫兹波段关键功能器件主要包括太赫兹波段的滤波器、混频器、衰减器、调制器、天线导波结构及信道化组件等,在通信系统中扮演频率选择、将低频信号搬至太赫兹频段、信号功率放大等角色,无线通信系统所需的关键电路正是由这些元件组成的,为实现太赫兹通信系统的集成应用奠定坚实基础。开发调制范围大、自动调控电磁波方向、速度快的太赫兹波段功能器件对于推动太赫兹通信链路调制技术的发展、处理基带信号及设计高效的太赫兹通信设备等具有重要意义,有利于加快利用太赫兹波进行无线通信的步伐。太赫兹器件及其特性见表 1。

太赫兹器件的发展为实现更快的无线通信奠定了基础<sup>[38-39]</sup>。处于光子学和电子学过渡区域的太赫兹辐射探测等相关器件的研究备受关注,基于半导体纳米结构、石墨烯、磷化铟等新型半导体材料或超材料的太赫兹器件同样也是研究的热点。国内太赫兹通信原型系统多数处于仿真阶段,在实际应用中应考虑实时性能、环境、通信距离、功耗等方面的性能指标。

#### 2.1.2 太赫兹天线

太赫兹天线是太赫兹无线通信系统最前端的关键部分,承载着通信系统收发信号的重要作用。天线的性能(如工作带宽、增益)直接影响到通信系统的频率效率、传输速率、可靠性。大规模天线技术(massive MIMO)经过 10 年的发展将随着 5G 部署开启真正的商用之旅,使 5G 频谱效率指标相对于 4G 有了显著提升,随着太赫兹天线结构、加工工艺的不断改进,其性能需要逐步提升以满足 5G、6G 时代新场景与新应用的需求。预计无线数据通信量和连接物的数量将在 6G 的范围内指数增长,大规模天线可能无法满足未来场景。目前,超大规模天线技术处在探索阶段,将提供更高的能量效率、更高的频谱效率等。太赫兹天线及其特点如表 2 所示。

在太赫兹潜在通信场景中,超材料诸如石墨烯等被应用于太赫兹天线技术,改变其微结构样式、尺寸和排列方式可对电磁波的响应强度进行调控,增强天线增益、提高信道容量及方向性等,为太赫兹通信技术的

表 1 太赫兹器件及其特性

Table 1 Terahertz devices and their characteristics

Terahertz device	Feature	Application	Reference
Multi-hole core photonic crystal fiber	75.28% high core power; superior optical parameters, high birefringence, high fidelity; low bending loss	Long-range, high data rate, terahertz broadband communications	Upadhyay et al. <sup>[29]</sup>
Terahertz guided-mode resonant trap filter	Variable filter strength; high quality factor; low refractive index; low absorption loss	Terahertz long-distance communication, sensing, etc.	Bark et al. <sup>[30]</sup>
Dual parallel Mach-Zendel modulator	Reduces signal processing complexity and system cost by eliminating the need for pre-coding techniques and digital-to-analog conversion	Generate wide spectrum orthogonal phase shift keyed vector signals	Yang et al. <sup>[31]</sup>
Bandstop filter	Narrow bandwidth; deep band resistance; polarization insensitive	Terahertz communications, terahertz modulation devices, terahertz imaging, etc.	Zhang et al. <sup>[32]</sup>
Tunneling field effect transistors for sensitive terahertz detection	High sensitivity; electrically tunable energy band structure; high responsiveness and low noise detection	Fast and sensitive wireless communication detector	Gayduchenko et al. <sup>[33]</sup>
Ultra compact integrated terahertz modulator	High modulation depth; transmissive adjustable	Compact modulator	Kim et al. <sup>[34]</sup>
Homogenizing rectifier	Precise manipulation of class II Dirac Fermionic states; wide-band operation; high dynamic range	High-frequency operation in polarization-sensitive sensing, communications and imaging	Zhang et al. <sup>[35]</sup>
Flexible terahertz metamaterial devices	Dynamic terahertz control at the picosecond time scale; optical control of the Fano resonance state	High-efficiency terahertz communication devices, terahertz neuromorphic photonics and smart sensor systems	Pitchappa et al. <sup>[36]</sup>
Ultra-broadband silicon plasma organic hybrid modulator	Up to 50 Gbit/s line rate; 0.2885 THz carrier frequency; direct conversion of data streams between terahertz and optical domains	Integration of terahertz wireless links with fiber optic infrastructure	Ummethala et al. <sup>[37]</sup>

表 2 天线及其特性

Table 2 Antennas and their characteristics

Antenna	Feature	Application	Reference
Super directivity terahertz photoconductive antenna	Dielectric resonator enhances directionality; spherical cover as dielectric resonant antenna; efficiency and radiation directionality improved	Optimal design of super directional antenna	Lu et al. <sup>[40]</sup>
MIMO antenna array	Improved isolation between MIMO antenna units; corrected operating frequency and radiation direction maps	Electronic products	Song et al. <sup>[41]</sup>
Microstrip array antenna	Enhanced antenna gain; suitable bandwidth and directionality; communication range can exceed 0.1 km	Short-range 6G cellular communication system	Nissanov et al. <sup>[42]</sup>
Fractal chip antenna	Field emission intensity is independent of frequency; generates fractal electromagnetic fields in the far field	Wireless nanonetworks; terahertz wireless communications	Blackledge et al. <sup>[43]</sup>
Yagi-Uda antenna array	Adjustable frequency response; reconfigurable directional map	Television broadcasting and telecommunication, biomedical and imaging technologies, etc.	Yadav et al. <sup>[44]</sup>
Terahertz patch antenna	Gain improvement; channel capacity enhancement; additional channel capacity can be modified	Indoor communication scenarios	Temmar et al. <sup>[45]</sup>



发展和应用提供了新的思路和手段,实现太赫兹天线阵列向集成化和小型化、超宽带、高增益、低能耗等方向发展。此外,随着人工智能和深度学习的快速发展,通信网络将向智能化方向进化,集中式和分布式超大规模天线技术将为新的应用提供更好的覆盖和连接性能。

## 2.2 太赫兹信道建模

太赫兹信道建模将直接影响太赫兹通信的实际应用场景,通常有 3 种类型的建模方法:参数化统计信道建模、确定性信道建模和参数化半确定性信道建模<sup>[46]</sup>。由于太赫兹波衰减较大,信道传播路径稀疏性较强,确定性信道建模和参数化半确定性信道建模更适合将来的太赫兹信道建模。

任智等<sup>[47]</sup>提出一种低干扰多个域网太赫兹无线个域网介质访问控制协议以解决常规信道时间分配时段的网络间节点传输数据干扰问题,可应用于未来太赫兹信道中来提高消息传输成功率、网络吞吐量等。Bashir等<sup>[48]</sup>提出一种适用于太赫兹通信的 MIMO 信道模型,与传统太赫兹单信道模型相比具有更高的信道容量和支持更高的传输能力,从而为完善信道机制、进一步研究纳米通信中太赫兹通信环境下 MIMO 信道估计与均衡提供前期方案。张文茹等<sup>[49]</sup>重构综合车辆环境三维模型,利用射线跟踪仿真萃取路径损耗、均方根时延扩展和角度扩展等典型信道参数,定量地分析并总结其对车辆通信的影响,表征 23 GHz 车载移动通信信道的特性。杨丽花等<sup>[50]</sup>提出一种新型的具有遮挡损耗的路径损耗模型对办公室内大尺度衰减特性进行研究,利用遮挡损耗修正遮挡物带来的影响,分析了遮挡物动态变化时传输频率与遮挡损耗的关系,为高频段室内无线通信系统的设计提供实践依据。

太赫兹通信信道建模需要对多种应用场景中的信道模型进行分析和研究,在面向奥运会等高密集人流活动、复杂室内环境、车联网甚至全息通信等应用场景时,应进一步探索适用于太赫兹信道的各种模型、组件、协议等,以适应场景多样化的未来需求。

## 2.3 太赫兹通信空中接口技术

与 5G 空中接口技术相比,太赫兹通信具有超大带宽的资源优势。但是,太赫兹无线通信技术与现阶段描述的系统之间的硬件链路存在较大变频损耗、有限采样带宽等技术问题,对太赫兹通信空中接口技术提出了新的要求并带来了新的机遇,如超大规模天线、基带信号的波形设计、波束管理、调制编码等技术。目前,诸多学者已提出一些新方案,期望为推进 6G 太赫兹通信奠定基础。

陈松林等<sup>[51]</sup>研究了基于硅基等离子诱导透明超表面的动态可调太赫兹调制器,增强了硅的调制效果,为实现实际应用中的太赫兹空间光调制器提供了一种实际应用的可能。沈仕远等<sup>[52]</sup>基于相变材料二氧化钒( $\text{VO}_2$ )和编码超表面技术设计了一种双向太赫兹多波束调控器件,能够实现反射模式和透射模式。如图 1 所示,两种模式均扩展了太赫兹室内通信覆盖范围,实现了对太赫兹波的双向动态调控,在未来 6G 太赫兹无线通信场景中发挥极大作用。Kumar 等<sup>[53]</sup>基于正交频分复用与偏移正交幅度调制(OQAM)信号的循环平稳特性提出了一种射频干扰环境下的盲信噪比估计方法,适用于多径衰落和快衰落瑞利信道。Qi 等<sup>[54]</sup>提出一种可以任意操纵太赫兹波散射模式的高效反射型编码超表面。通过优化编码序列证明了超表面具有较强的控制反射太赫兹波的能力,为复杂的太赫兹波操作提供了一个新的自由度,有助于超表面向实际应用的发展。

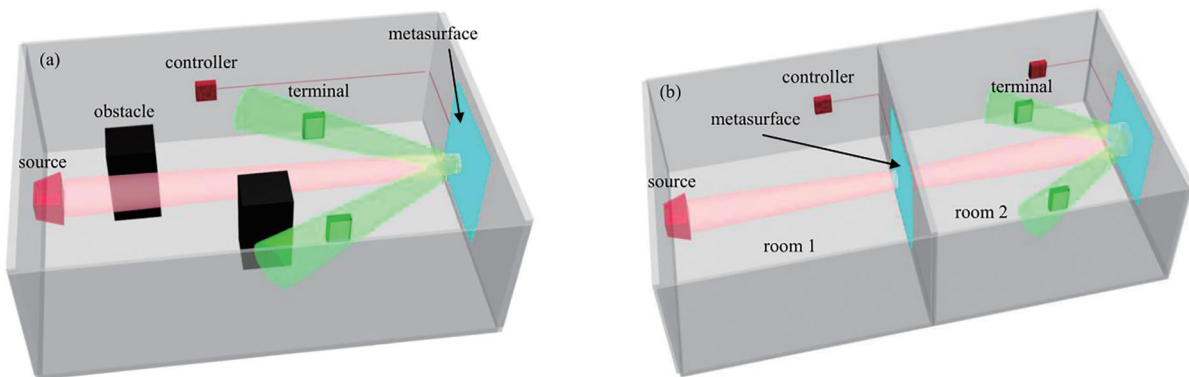


图 1 双向太赫兹多波束调控器件的应用场景<sup>[52]</sup>。(a)反射模式应用场景;(b)透射模式应用场景

Fig. 1 Application scenarios of bidirectional terahertz multi beam control device<sup>[52]</sup>. (a) Application scenario of reflection mode; (b) application scenario of transmission mode

太赫兹通信系统的空中接口技术有待朝灵活空中接口协作、智能网络管理、合理的资源预留和实时调度、支持多种太赫兹通信场景的鲁棒性等方向发展,以适应 6G 太赫兹通信技术的特点和优势。

## 3 太赫兹通信新兴应用

发展日趋完善的 5G 将频谱资源拓展到了 3~300 GHz 的频段,为实现超高速无限回传、覆盖全球的

高精度及高可靠性等网络,超宽带宽的太赫兹频段在 5G 和 6G 无线系统中具有广阔的应用前景。本文主要从 3 个微观/纳米尺度的应用场景方面进行阐述。

### 3.1 太赫兹室内通信

根据目前室内宽带高速无线通信系统持续增长的需求,太赫兹波段具备 10 GB/s 以上的通信速率的特点,超高速太赫兹室内通信将是最重要的应用场景之一。太赫兹波具有很强的方向性,太赫兹信号的传播路径很容易被室内障碍物阻挡。Salhi 等<sup>[55]</sup>介绍了基于矢量网络分析仪的办公室、工业环境等场景中的宽带信道传播信道测量,考虑到现实复杂环境对传播信道的影响,在 50~325 GHz 范围内,视距无线传输 (LOS) 在以上场景中占主导地位,反射信号是传播过程中不可忽略的一部分。Ma 等<sup>[56]</sup>提出太赫兹频段智能反射面 (IRS) 以缓解室内覆盖问题,如图 2(b) 所示,通过调整 IRS 元件的离散相移重新配置电磁波的传播,实现接近最优的覆盖性能,降低了计算负担。在没有 IRS 的传统通信方案的情况下,如图 2(a) 所示,太赫兹信号的功率分布差距明显,传输功率被设定为 100 dBm,由于太赫兹波的路径损耗极高,给定用户的接收功率约为 -67.35 dBm,该用户几乎无法接收太赫兹信号。在 IRS 增强的通信方案中,该用户在房间角落的接收功率高达 -4.76 dBm,可以实现更好的覆盖性能。一旦 IRS 解决了高频通信中存在的覆盖问题,太赫兹通信系统将为未来 6G 室内通信场景铺平道路。

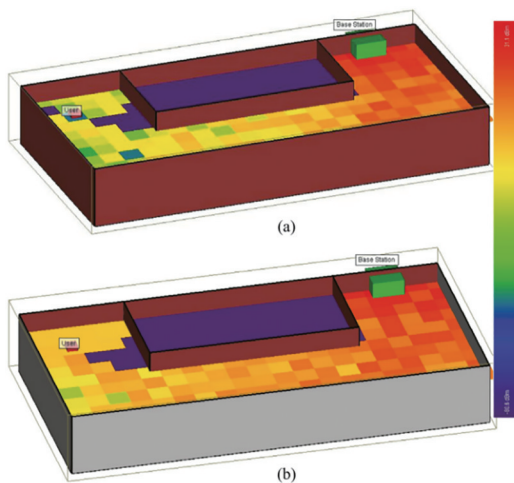


图 2 不同情况下的功率分布比较<sup>[56]</sup>。(a)无 IRS 情况;  
(b) IRS 控制情况

Fig. 2 Comparison of power distributions in different cases<sup>[56]</sup>.  
(a) No IRS case; (b) IRS control case

室内定位需要严格处理非视距 (NLOS) 传播。Fan 等<sup>[57]</sup>提出一种结构化双向长短时记忆 (SBI-LSTM) 递归神经网络体系结构来解决基于信道状态信息 (CSI) 的三维太赫兹室内定位问题。通过模拟大

厅和实验室两种室内环境,利用来自多个发射机的 CSI 估计目标接收器的三维位置,实现超精确定位。在 NLOS 环境下,以平均距离误差为度量的定位精度在 0.27 m 以内,SBi-LSTM 模型在两种室内环境下都有最佳的性能。

### 3.2 太赫兹纳米通信

太赫兹波长非常短,被认为是纳米级通信<sup>[58-59]</sup>一个有前途的候选波段。纳米级网络通常用于 1 m 或更短的距离,是太赫兹通信的一个特色应用,太赫兹通信有望用作无线纳米网络通信频段以实现纳米传感器物联网、分子通信、纳米物联网等各种通信应用场景。

Zeng 等<sup>[60]</sup>制备了基于纤维素纳米纤维和导电纳米材料的太赫兹双折射仿生气凝胶,如图 3 所示,展现出惊人的太赫兹双折射性,在传感器、电磁波吸收或屏蔽等方面具有巨大的应用潜力。Dong 等<sup>[61]</sup>提出了一种具有极端太赫兹非线性和敏感的共振自调制“tera-nano”超表面,如图 4 所示,消除了对高强度太赫兹场 ( $> 100 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) 的需求,在波束控制、下一代无线通信和网络、探索不需要强太赫兹光源的材料系统中具有潜在应用,实现了微/纳米空间区域内定位和增强场强。Iqbal 等<sup>[62]</sup>设计了一种工作在太赫兹波段的智能/认知纳米接收器,研究其模式检测和调制分类的两个基本成分并验证两种方法的有效性,为后续工作开辟了许多可能性,例如,调制预测以及使用机器学习工具进行调制分类、基于循环平稳性的模式检测方法的研究等。以上研究均表明基于亚波长结构的太赫兹功能器件有潜力将 6G 做成一个传感网,通过感知环境、人体等物理世界,实现人体健康检测、管道传感网络、虚拟现实等应用,将人类主观信息采集并传输到服务器,实现人机交互、数字孪生等新兴应用场景。

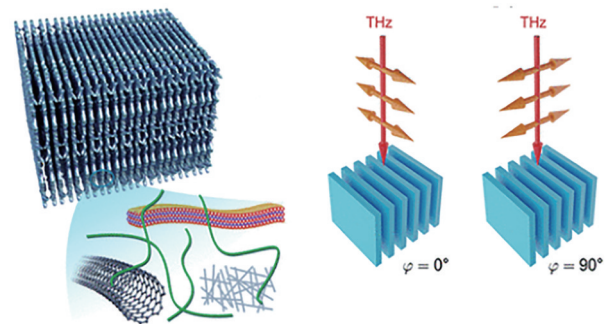


图 3 薄层多孔生物聚合物气凝胶<sup>[60]</sup>

Fig. 3 Thin-layer porous biopolymer aerogel<sup>[60]</sup>

### 3.3 太赫兹短距超高速无线通信

由于对更高速率和更大容量的无线通信的需求不断增长,太赫兹无线电有望成为超高速无线通信系统的候选者。其波长短、频带宽可以有效地解决高速宽



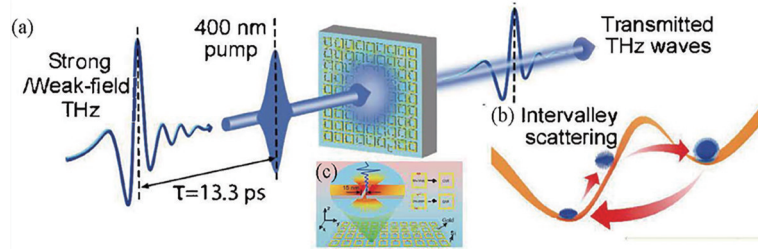


图 4 光掺杂对非线性太赫兹响应的影响<sup>[61]</sup>。(a) 400 nm 泵浦太赫兹探针系统原理图。400 nm 泵浦后太赫兹波被照射到 13.3 ps 的超表面上；(b) 强太赫兹波照射后发生谷间散射，降低了电子的迁移率；(c) 超表面示意图

Fig. 4 Effect of optical doping on nonlinear terahertz response<sup>[61]</sup>. (a) Schematic diagram of 400 nm pumped terahertz probe system. 400 nm pumped terahertz waves are irradiated onto 13.3 ps super surface after pumping; (b) inter-valley scattering occurs after irradiation of strong terahertz waves, which reduces mobility of electrons; (c) schematic diagram of super surface

带无线接入面临的诸多问题,适合于短距离通信(传输范围一般有限,小于几米)。Naghavi, Hu 等<sup>[63-64]</sup>已经初步探索了太赫兹技术用于虚拟现实(VR)、手机、可穿戴设备间以及电子器件间通信的芯片,虽然面临一些技术性挑战,但都证明了太赫兹通信应用于短距离高速无线通信的可能。

6G 移动通信标准有望以低延迟和低功耗传输 8 K 和其他超高清视频。大阪大学研究人员与 Rohm Co., Ltd.<sup>[65]</sup>演示了使用太赫兹波传输未压缩全分辨

率 8 K 超高清视频的方法,如图 5 所示,显示了超宽带太赫兹波能力,将提高与社会问题直接相关的远程医疗和远程办公的质量,并促进物理网络融合。Yang 等<sup>[66]</sup>研发了一种“拓扑保护”的太赫兹高速互连芯片,该芯片不仅能传输太赫兹波,还能以高达 11 GB 的数据速率传输,支持实时传输未压缩的 4 K 高清视频,超过 5G 无线通信每秒 10 GB 的理论上限,可以互连集成到无线通信设备中,为 6G 提供前所未有的 TB/s 的速度。

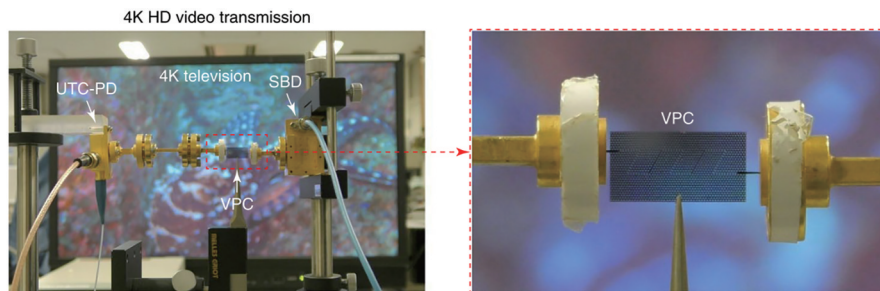


图 5 未压缩 4 K 高清视频传输的实验演示<sup>[66]</sup>

Fig. 5 Experimental demonstration of uncompressed 4K HD video transmission<sup>[66]</sup>

太赫兹通信技术将具备无限可能被应用于未来的通信网络中,除了上述应用场景,在车联网<sup>[67-68]</sup>、人体数字孪生<sup>[69-70]</sup>、物-物互联<sup>[71-72]</sup>、星间通信<sup>[73-75]</sup>、全息通信<sup>[76-78]</sup>等领域中也具有极大的潜力。亟须研发和管理可用频谱资源,解决太赫兹关键核心器件及芯片、信道建模、长距离传输等其他难以攻克的问题。

## 4 总结与展望

毫米波频段在 5G 中应用广泛,由于其对高传输速率等需求,此频段不足以支持 6G 环境。太赫兹通信技术被认为是提高未来网络性能最有前途的技术之一,虽然太赫兹通信技术具有明显的优势,但仍处于起步阶段,一些关键技术还远未成熟。要实现 6G 太赫兹通信的宏伟目标,许多技术问题还有待解决,未来在通信领域的发展可能涉及到以下几个研究方向:

1) 解决非视距传输等环境因素对太赫兹信号传

输的影响,目前已有部署高增益天线及智能反射面,研发具有主动调控太赫兹波束的有源动态调控器件等方法来减弱其影响,然而无法从根本上解决以上环境因素对太赫兹信号传输的影响问题,因此太赫兹信号编码调制技术将成为太赫兹通信中必须战胜的难题之一。

2) 实现超高速无线通信需要超高的处理能力才能处理超宽带宽和超大规模天线,有必要设计一种超高速宽带处理芯片,这将导致极高的功耗,对太赫兹功率放大器也要进一步研究。要想在太赫兹频段实现长距离传输,必须考虑如何将太赫兹频谱连接到传输线上,设置连接接口将是未来发展的一个难点。

3) 为了充分利用高频频谱,应提高太赫兹波设备终端对应的元器件发展水平。电子元件如驱动器必须随时可用,提高各器件独立执行任务的能力,使其可靠地进行通信,设计太赫兹电子学、光子学和混合电子光

子学技术是未来的发展方向,最有可能的是,6G 将见证太赫兹/自由空间-光学混合部署在混合电子光子收发器中的演变。同时,研发低成本的太赫兹设备及系统备受关注。

4) 在更高频率中必须解决射频硬件复杂性和并行性增加的问题,使太赫兹无线通信系统走向实用化。此外,在存在技术边界的情况下太赫兹频谱进行分类时,各种表面的信号穿透能力和反射能力是需要进一步考虑的两个基本参数。

5) 针对 6G 的新诉求,面对数据海量、实时同步等要求,深度融合人工智能、大数据等新一代信息技术,设计太赫兹通信感知一体化系统并优化性能,为智能化管理和提供服务提供可能,实现由万物互联到万物智联的跃迁。

太赫兹通信具有极大的潜力推动下一代移动通信技术的发展,未来发展趋势可概括为:更高网络性能、更小尺寸、更低成本、更智能、更实用、空天地无缝互联等。本文从不同的角度重点阐述了 6G 的特性、愿景及实现下一代移动通信网络的潜在关键技术——太赫兹无线通信技术的研究进展,综述其通信特点及现阶段推进太赫兹通信技术发展的关键技术,简述了微观/纳米尺度 3 大主要应用场景并进行了总结和展望,本文将作为无线通信迈向太赫兹时代做出一定贡献。

### 参 考 文 献

- [1] Lu Y, Zheng X R. 6G: a survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2020, 19: 100158.
- [2] 周儒雅, 唐万恺, 李潇, 等. 基于可重构智能表面的移动通信简要综述[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 63-69.  
Zhou R Y, Tang W K, Li X, et al. A brief survey of mobile communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 63-69.
- [3] de Lima C, Belot D, Berkvens R, et al. Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: an overview of technologies, opportunities and challenges [J]. IEEE Access, 2021, 9: 26902-26925.
- [4] Saha R K. 3D spatial reuse of multi-millimeter-wave spectra by ultra-dense in-building small cells for spectral and energy efficiencies of future 6G mobile networks[J]. Energies, 2020, 13(7): 1748.
- [5] Alsharif M H, Kelechi A H, Albreem M A, et al. Sixth generation (6G) wireless networks: vision, research activities, challenges and potential solutions[J]. Symmetry, 2020, 12(4): 676.
- [6] Zhang J H, Tang P, Yu L, et al. Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(1): 39-61.
- [7] You X H, Wang C X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 110301.
- [8] Qamar F, Siddiqui M U A, Hindia M N, et al. Issues, challenges, and research trends in spectrum management: a comprehensive overview and new vision for designing 6G networks[J]. Electronics, 2020, 9(9): 1416.
- [9] Wang M H, Zhu T Q, Zhang T, et al. Security and privacy in 6G networks: new areas and new challenges[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 281-291.
- [10] Xu H, Klaine P V, Onireti O, et al. Blockchain-enabled resource management and sharing for 6G communications [J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 261-269.
- [11] Yuan Y F, Zhao Y J, Zong B Q, et al. Potential key technologies for 6G mobile communications[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(8): 217-235.
- [12] 祁权, 杨琳. 国际电信联盟发展现状概述[J]. 中国无线电, 2020(8): 28-30.  
Qi Q, Yang L. Overview of the development of ITU[J]. China Radio, 2020(8): 28-30.
- [13] Herranz C, Zhang M L, Mezzavilla M, et al. A 3GPP NR compliant beam management framework to simulate end-to-end mmWave networks[C]//Proceedings of the 21st ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, October 28-November 2, 2018, Montreal, QC, Canada. New York: ACM Press, 2018: 119-125.
- [14] Yang L. Security in 6G: the prospects and the relevant technologies[J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2020, 5(3): 271-289.
- [15] Huq K M S, Busari S A, Rodriguez J, et al. Terahertz-enabled wireless system for beyond-5G ultra-fast networks: a brief survey[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 89-95.
- [16] 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(6): 59-61.  
Teng X Q, Peng J. Countries around the world actively promote the progress of 6G research[J]. Informatization Construction, 2020(6): 59-61.
- [17] 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, June 10-15, 2018, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1480-1483.
- [18] Yu X B, Miyamoto T, Obata K, et al. Direct terahertz communications with wireless and fiber links[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 1-6, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019: 19079951.
- [19] Nayak S, Patgiri R. A vision on intelligent medical service for emergency on 5G and 6G communication era [J]. EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, 2020, 6(22): 166293.
- [20] Zhang S W, Liu J J, Guo H Z, et al. Envisioning device-to-device communications in 6G[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 86-91.

- [21] Zhou Y Q, Liu L, Wang L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [22] 颀斌. 毫米波在 5G 中的应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(3): 87-92.  
Xie B. Application of millimeter wave in 5G[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(3): 87-92.
- [23] 温正阳, 刘畅, 张彬, 等. 5G 毫米波在移动通信系统的应用探究[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(2): 36-40.  
Wen Z Y, Liu Y, Zhang B, et al. Application research of the 5G millimeter wave in mobile communication system [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(2): 36-40.
- [24] He C, Ren Z X, Wang X, et al. Millimeter-wave wireless communications for home network in fiber-to-the-room scenario[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(4): 441-456.
- [25] Yang J, Xu J, Li X, et al. Integrated communication and localization in millimeter-wave systems[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(4): 457-470.
- [26] 王康年, 刘红云, 卢明伦, 等. 太赫兹通信技术发展现状及其军事应用展望[J]. 无线电通信技术, 2014, 40(5): 1-5.  
Wang K N, Liu H Y, Lu M L, et al. Development status and military application prospect of terahertz communication technology[J]. Radio Communications Technology, 2014, 40(5): 1-5.
- [27] Zhang H Q, Zhang L, Yu X B. Terahertz band: lighting up next-generation wireless communications[J]. China Communications, 2021, 18(5): 153-174.
- [28] 曹浩一, 董亚洲, 王正, 等. 太赫兹通信芯片关键技术与系统发展浅析[J]. 数据与计算发展前沿, 2021, 3(5): 82-97.  
Cao H Y, Dong Y Z, Wang Z, et al. Analysis of key technology of terahertz communication chip and development of communication system[J]. Frontiers of Data & Computing, 2021, 3(5): 82-97.
- [29] Upadhyay A, Singh S, Sharma D, et al. A highly birefringent bend-insensitive porous core PCF for endlessly single-mode operation in THz regime: an analysis with core porosity[J]. Applied Nanoscience, 2021, 11(3): 1021-1030.
- [30] Bark H S, Jang K H, Lee K, et al. THz guided-mode resonance notch filter with variable filtering strength[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 1307.
- [31] 杨雄伟, 赵峰. 基于 OOK 调制的光载太赫兹 QPSK 信号产生[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0806002.  
Yang X W, Zhao F. Generation of terahertz quadrature phase shift keying signals over fiber with on-off-keying modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0806002.
- [32] 张旻南, 李虹, 马立鹏, 等. 基于太赫兹人工超材料的带阻滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(2): 185-188.  
Zhang M N, Li H, Ma L P, et al. A terahertz metamaterial for band-stop filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(2): 185-188.
- [33] Gayduchenko I, Xu S G, Alymov G, et al. Tunnel field-effect transistors for sensitive terahertz detection[J]. Nature Communications, 2021, 12: 543.
- [34] Kim M, Kim S, Kim S. Ultra-compact integrated terahertz modulator based on a graphene metasurface[J]. Optics Letters, 2021, 46(3): 605-608.
- [35] Zhang L, Chen Z, Zhang K, et al. High-frequency rectifiers based on type-II Dirac fermions[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1584.
- [36] Pitchappa P, Kumar A, Prakash S, et al. Volatile ultrafast switching at multilevel nonvolatile states of phase change material for active flexible terahertz metadevices[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(17): 2100200.
- [37] 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.
- [38] 汪国崔, 胡滨, 张岩. 动态超构表面设计及功能器件[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900001.  
Wang G C, Hu B, Zhang Y. Dynamic metasurface design and functional devices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900001.
- [39] 丛龙庆. 主动式太赫兹超材料器件综述[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914003.  
Cong L Q. Active terahertz metadevices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1914003.
- [40] Lu G Z, Zhao R Q, Yin H C, et al. Study of the super directive THz photoconductivity antenna[J]. Plasmonics, 2021, 16(3): 677-685.
- [41] Song R G, Chen X X, Jiang S Q, et al. A graphene-assembled film based MIMO antenna array with high isolation for 5G wireless communication[J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2382.
- [42] Nissanov U, Singh G, Gelbart E, et al. Highly directive microstrip array antenna with FSS for future generation cellular communication at THz band[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118(1): 599-617.
- [43] Blackledge J M, Boretti A, Rosa L, et al. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1060(1): 012001.
- [44] Yadav R, Pandey V S, Kumar S. A pattern reconfigurable graphene-based Yagi-Uda antenna with  $TM_{018}$  mode generation for THz applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(5): 5325-5338.
- [45] Temmar M N E, Hocini A, Khedrouche D, et al. Analysis and design of MIMO indoor communication system using terahertz patch antenna based on photonic crystal with graphene[J]. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2021, 43(4): 100867.
- [46] 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 J Y, Zhang Z H, Li F C, et al. Key technology and development vision of terahertz communication[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(4): 1-5.
- [47] 任智, 苏新, 郭黎, 等. 低干扰多 PAN 太赫兹无线个域网 MAC 协议[J]. 光通信研究, 2021(4): 66-71.
- Ren Z, Su X, Guo L, et al. Low interference multi-PAN MAC protocol for terahertz wireless PAN[J]. Study on Optical Communications, 2021(4): 66-71.
- [48] Bashir S H, Alsharif M H, Khan I, et al. MIMO-terahertz in 6G nano-communications: channel modeling and analysis[J]. Computers, Materials & Continua, 2020, 66(1): 263-274.
- [49] 张文茹, 汪尧乔, 官科, 等. 城市交通环境下 23GHz 信道仿真建模[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 2069-2080.
- Zhang W R, Wang W Q, Guan K, et al. Channel simulation modeling at 23GHz in urban scenarios[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(10): 2069-2080.
- [50] 杨丽花, 刘加欢, 任露露, 等. 室内办公室高频段信道测量和大尺度衰落建模[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(1): 11-20.
- Yang L H, Liu J H, Ren L L, et al. High frequency broadband channel measurement and large scale fading modeling in indoor office scenario[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications: 2022, 45(1): 11-20.
- [51] 陈松林, 乐进, 王伟俊, 等. 基于硅基等离子超表面的可调太赫兹调制器[J]. 激光杂志, 2021, 42(1): 34-39.
- Chen S L, Yue J, Wang W J, et al. Adjustable terahertz modulator based on silicon-based plasma meta-surface[J]. Laser Journal, 2021, 42(1): 34-39.
- [52] 沈仕远, 王元圣, 池瑶佳, 等. 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1): 1-6.
- Shen S Y, Wang Y S, Chi Y J, et al. Phase transition material based coding metasurface for two-way terahertz beam steering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(1): 1-6.
- [53] Kumar J T, Sridevi C H, Kumar V S. Blind signal-to-interference-plus-noise ratio estimation of OFDM/OQAM system in radio frequency interference environment [J]. Soft Computing, 2021: 1-8.
- [54] Qi Y P, Zhang B H, Ding J H, et al. Efficient manipulation of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces and applications of such metasurfaces[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(2): 391-398.
- [55] Salhi M A, Kleine-Ostmann T, Schrader T. Propagation channel measurements in the mm- and sub-mm wave range for different indoor communication scenarios[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2021, 42(4): 357-370.
- [56] Ma X Y, Chen Z, Chen W J, et al. Intelligent reflecting surface enhanced indoor terahertz communication systems [J]. Nano Communication Networks, 2020, 24: 100284.
- [57] Fan S K, Wu Y Z, Han C, et al. SIABR: a structured intra-attention bidirectional recurrent deep learning method for ultra-accurate terahertz indoor localization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(7): 2226-2240.
- [58] Sharma S, Deka K, Bhatia V. Thresholdless detection of symbols in nano-communication systems[J]. IEEE Transactions on NanoBioscience, 2020, 19(2): 259-266.
- [59] Norouzi A, Heikalabad S R. Design of reversible parity generator and checker for the implementation of nano-communication systems in quantum-dot cellular automata [J]. Photonic Network Communications, 2019, 38(2): 231-243.
- [60] Zeng Z H, Mavrona E, Sacré D, et al. Terahertz birefringent biomimetic aerogels based on cellulose nanofibers and conductive nanomaterials[J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 7451-7462.
- [61] Dong T, Li S X, Manjappa M, et al. Nonlinear THz-nano metasurfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(24): 2100463.
- [62] Iqbal M O, Rahman M M U, Imran M A, et al. Modulation mode detection and classification for *in vivo* nano-scale communication systems operating in terahertz band[J]. IEEE Transactions on Nanobioscience, 2019, 18(1): 10-17.
- [63] Naghavi S M H, Seyedabbaszadehesfahlani S, Khoieini F, et al. 22.4 A 250GHz autodyne FMCW radar in 55nm BiCMOS with micrometer range resolution[C]//2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference, February 13-22, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021: 320-322.
- [64] Hu Y Z, You J, Tong M Y, et al. Pump-color selective control of ultrafast all-optical switching dynamics in metaphotonic devices[J]. Advanced Science, 2020, 7(14): 2000799.
- [65] Suzuki D, Li K, Ishibashi K, et al. A terahertz video camera patch sheet with an adjustable design based on self-aligned, 2D, suspended sensor array patterning[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(14): 2008931.
- [66] Yang Y, Yamagami Y, Yu X, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. Nature Photonics, 2020, 14(7): 446-451.
- [67] 三部门印发《国家车联网产业标准体系建设指南(智能交通相关)》2022 年底初步构建起标准体系[J]. 信息技术与标准化, 2021(4): 7.
- Three departments issued the “national telematics industry standards system construction guide (intelligent transportation-related)” at the end of 2022 to initially build up the standards system[J]. Information Technology & Standardization, 2021(4): 7.
- [68] Internet and World Wide Web-Internet of Things. New internet of things data have been reported by researchers at shanghai jiao tong university (millimeter-wave communication for internet of vehicles: status, challenges, and perspectives) [EB/OL]. [2021-03-06]. <https://energycentral.com/news/new-internet-things-data-have-been-reported-researchers-shanghai-university-electric-power>.
- [69] 杨刚, 李梦洁, 崔朝臣, 等. 数字孪生: 内涵、挑战及应

- 用[J]. 软件导刊, 2021, 20(1): 6-10.
- Yang G, Li M J, Cui C C, et al. Digital twin: connotation, challenge and application[J]. Software Guide, 2021, 20(1): 6-10.
- [70] Agostinelli S, Cumo F, Guidi G, et al. Cyber-physical systems improving building energy management: digital twin and artificial intelligence[J]. Energies, 2021, 14(8): 2338.
- [71] 周宇. 万物互联下的 5G 通信技术应用[J]. 数字通信世界, 2020(12): 189-190.
- Zhou Y. Application of 5G communication technology under the Internet of everything[J]. Digital Communication World, 2020(12): 189-190.
- [72] 邹旭鹏, 史纪强, 彭英, 等. 万物互联时代数据安全保护与保密问题思考[J]. 中国信息化, 2021(3): 73-76.
- Zou X P, Shi J Q, Peng Y, et al. Thoughts on data security protection and confidentiality in the era of internet of everything[J]. China Information Technology, 2021(3): 73-76.
- [73] Mostafa Shishter Y. Probability density of irradiance for electromagnetic waves propagating under multiple scattering effects: application to deep space communications [J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34(7): e4751.
- [74] Reznik S V, Novikov A D. Evolution, features, and prospects of materials science innovations in the development of space communication systems: a short survey[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1060(1): 012024.
- [75] Bai L T, Zhu Z B, Li X J. Analysis of THz space communication link based on STK[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1971(1): 012073.
- [76] Manolova A, Tonchev K, Poulkov V, et al. Context-aware holographic communication based on semantic knowledge extraction[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 120(3): 2307-2319.
- [77] Baek Y, Park Y. Intensity-based holographic imaging via space-domain Kramers-Kronig relations[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5): 354-360.
- [78] Calvanese Strinati E, Barbarossa S, Gonzalez-Jimenez J L, et al. 6G: the next frontier: from holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 42-50.