DOI：10.19789/j.1004-9398.2024.02.001
文献引用：孙东云，程雅涛，郭海琳，等．太赫兹通信发展概述[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（2）：3-13. SUN D Y，CHENG Y T，GUO H L，et al. Overview of terahertz communication development[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（2）：3-13.

太赫兹通信发展概述*

孙东云，程雅涛，郭海琳，陈奕彤，顾子健，张朴婧，杨　哲**，张存林**
（首都师范大学物理系，太赫兹光电子教育部重点实验室，北京　100048）

摘要：第6代移动通信（6G）预计在未来提供低延迟、低功耗、高容量和大规模的通信服务，太赫兹通信具有大带宽、高速率和低延迟的特点，被视为6G时代的关键技术路线。文章介绍了太赫兹通信系统信号产生技术路线、信号接收技术、信号传输特性和信道建模，并分析了超大规模多输入多输出技术、智能反射面和关键太赫兹器件等技术问题的进展与挑战。此外，还探讨了太赫兹通信在短距离超高速通信、空间通信、微尺度通信和高保密通信领域的潜在应用。尽管存在一些技术障碍，但随着研究的深入，太赫兹通信相关难题定会逐步解决，6G时代的到来预计将不再遥远。

关键词：太赫兹通信；6G；信道建模；超大规模MIMO；智能反射面
中图分类号：TN92；O434　　**文献标志码**：A

Overview of terahertz communication development*

SUN Dongyun，CHENG Yatao，GUO Hailin，CHEN Yitong，GU Zijian，ZHANG Pujing，YANG Zhe**，ZHANG Cunlin**
（Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics，Ministry of Education，Department of Physics，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：The sixth generation of mobile communications（6G）is expected to offer low-latency，low-power，high-capacity，and large-scale communication services in the future. Terahertz communication，with its wide bandwidth，high speed，and low latency，is considered a key technological pathway for the 6G era. This article details the development routes for signal generation in THz communication systems signal reception technologies，signal transmission characteristics，and channel modeling. It also analyzes the progress and challenges in technological issues such as ultra-massive multiple-in multiple-out，intelligent reflecting surfaces，and critical THz devices. Furthermore，potential applications of THz communication in areas like short-range ultra-high-speed communication，space communication，micro-scale communication，and high secure communication fields are explored. Although there are some technical obstacles，as research progresses，the challenges associated with terahertz communication are expected to be gradually resolved. The advent of the 6G era is also anticipated to be not far off.

Keywords：terahertz communication；6G；channel modeling；ultra-massive MIMO；intelligent reflecting surface
CLC：TN92；O434　　**DC**：A

收稿日期：2024-03-25
* 国家自然科学基金面上项目（61875140）；国家自然科学青年基金项目（12104251）
** 通信作者：yangzhe7010@cnu.edu.cn；cunlin_zhang@cnu.edu.cn

0 引 言

随着信息技术的快速发展,人们已经进入了数据需求呈指数增长的时代。根据Edholm带宽定律[1-2],带宽需求几乎每18个月翻一番。高清视频流、万物互联、城市智能化以及远程控制等应用的不断涌现,推动了无线通信技术的快速更新和发展。第5代移动通信网络(5G)技术的部署虽然在一定程度上满足了当下的需求,但对于未来更高速率和更低延迟的需求,5G可能很快会显示出局限性[3]。业内人员预测,在2030年左右正式进入第6代移动通信网络(6G)商用阶段[4]。本文列出了6G通信的几个关键性能指标,相较于5G通信有10~100倍的提升[5]:在峰值数据速率上,5G为20 Gbps,6G为1~10 Tbps;在时延上,5G为>1.0 ms,6G为<0.3 ms;在区域流量密度上,5G为0.01 Gbps/(s·m^2),6G为1.00 Gbps/(s·m^2)。

在这样的大背景下,太赫兹无线通信作为6G通信一项潜在的解决方案引起了全球科技领域的广泛关注。太赫兹波段的频率为0.1~10 THz,波长为3 mm~30 μm,介于微波波段与远红外光波段之间,是一个尚未被大量发掘的领域,有非常广阔的应用价值和发展空间[6]。太赫兹无线通信具有以下几点优势:(1)具有较高的频率,可以带来非常可观的带宽,太赫兹频谱带宽是长波、中波、短波和微波总带宽的1 000倍,相较于毫米波具有极大提升,理论上信号带宽可以达到太赫兹级别[7];(2)相较于微波,太赫兹波的波长较短,自由空间中的衍射现象较少,能够更有效地实现定向波束的传输,从而提高信息传递的指向性,也可以大大提高通信内容的安全性;(3)相较于红外光波段,太赫兹波能够穿透烟雾和浮尘等障碍物,允许非视距(non line of sight,NLOS)传输,并且受环境光噪声影响较小,这意味着其在多种环境下都能保持较好的传输性能,实现更稳定和可靠的通信连接[8-13]。

太赫兹无线通信技术涵盖了低频段(0.1~1.0 THz)和高频段(1~10 THz)2个主要频段,各自针对不同的通信场景和距离有着不同的适用性及优势。在低频段,具有多个可用于通信的"窗口",如300~376、385~443、453~515、626~711以及808~902 GHz,当然在中心频率120和240 GHz的太赫兹波损耗也相对较低,可用来进行无线通信[8],适合应用于远距离的空间通信、地面中短距离的点对点通信以及近距离的无线个人区域网等诸多场景。与传统的微波通信相比,这一频段能够提供更宽的带宽和更高的数据传输速率,是太赫兹通信技术的核心频段之一。对于高频段,这个频区的大气吸收损耗更高,地面无线通信更加困难,但在进行卫星间通信、卫星与航天器或深空探测器之间的通信时,大气层的影响几乎可以忽略不计。因此,这一频段非常适合用于空间通信场景。相较于空间激光通信系统,太赫兹空间通信在瞄准捕获跟踪系统的要求上相对较低,意味着在定位、捕获及跟踪方面更为灵活和容易实施。

我国在5G网络的部署方面表现出色,位居国际领先地位,因此在6G的发展中,也要做好前沿性的准备,以保持竞争优势。2019年6月由中国工业和信息化部推动成立IMT-2030(6G)推进组,成员包括中国主要的运营商、制造商、高校和研究机构;2021年6月,推进组正式发布《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书,内容涵盖总体愿景、八大业务应用场景、十大潜在关键技术等,并阐述了对6G技术未来发展的思考[14];2022年,华为6G研究团队成功开发并展出了一款太赫兹通信与感知融合的原型机(ISAC-THz)。该设备在220 GHz的频段下,不仅实现了对障碍物的毫米级精确成像,还达到了240 Gbps的超高速通信传输速度[15]。

本文首先从太赫兹通信系统入手,讲述了信号产生技术路线、信号接收技术、信号传输特性和信道建模;然后介绍了太赫兹通信的3项关键技术挑战:超大规模多输入多输出技术、智能反射面和关键太赫兹器件;最后概括了太赫兹通信在短距离超高速通信、空间通信、微尺度通信和高保密通信领域的潜在应用。本文系统性地回顾了太赫兹通信的当前发展现状,为太赫兹通信领域研究人员快速掌握太赫兹通信相关进展提供参考,为无线通信迈入6G时代做出一定贡献。

1 太赫兹通信系统

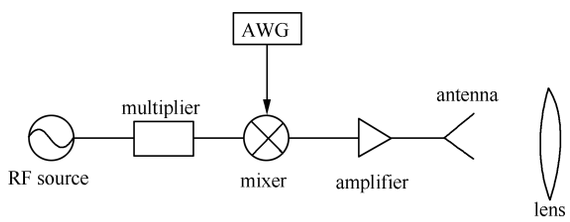
1.1 太赫兹通信系统分类

太赫兹通信系统分类有很多,按照其产生太赫兹信号方式可以分为3类:基于纯电子学方法产生;光子辅助方法,即光学外差法;全光子学方法,即量子级联激光器[16]。

1.1.1 纯电子学太赫兹通信系统

基于纯电子学技术的太赫兹通信系统因其小型化和易集成的特点备受关注。这类太赫兹发生

器由射频源、倍频器、电信号混频器及电信号放大器组成(图1)。在纯电子学太赫兹通信系统中,射频信号源产生频率约为几十GHz的射频信号。这个射频信号被送入倍频器,通过倍频操作将频率进一步提高。然后,使用电信号混频器生成调制信号,通过电信号放大器进行功率放大,并最终由天线发送出去。纯电子学太赫兹通信系统的结构简单且易于高度集成,但需要注意的是,该系统对电子设备性能的要求较高,且存在一定程度的信号转换损失,面临传输损耗和信号品质下降等挑战[17-18]。



注:RF source为射频源;AWG为任意波形发生器。

图1 纯电子学太赫兹信号发生系统[16]

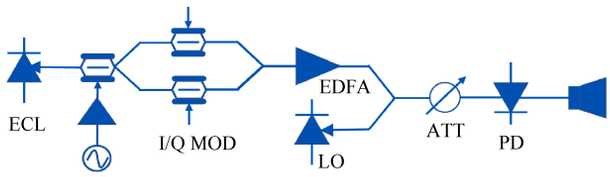
2008年,德国Braunschweig实验室在300 GHz信道上成功实现模拟视频信号的实时传输,该系统由基于肖特基二极管混频器的自主式发射和检测单元组成,传输距离长达22 m,为太赫兹通信领域的发展提供了重要的实验基础和技术支撑[19]。

2020年,日本NTT公司成功研发出一款基于80 nm磷化铟高电子迁移率晶体管(InP high electron mobility transistor,InP HEMT)的300 GHz收发机前端组件,利用16正交振幅调制(quadrature amplitude modulation,QAM)方式,在9.8 m的传输距离上实现了高达120 Gbps的传输速率[20]。

1.1.2 光子辅助太赫兹通信系统

基于光子辅助的太赫兹通信系统,是目前太赫兹通信系统的主流方案之一[16]。该通信系统利用2个相差一定频率的激光器来产生太赫兹信号,可以灵活地选择所需要的频率,并且可以通过光学技术手段来提高系统容量以及降低系统损耗,极大地提高了系统性能(图2)[21]。但是光子辅助太赫兹通信系统通常涉及光电子元件与电子元件的复杂集成,相较于纯电子学系统而言,整合这2种技术可能会更复杂,且需要更高的精密度和稳定性,并且光调制器等光学元件的成本较为昂贵,系统整体的能耗也是需要思考的问题[18]。

2004年,日本NTT集团通过引入单向载流子光电二极管在120 GHz频段实现了>10 Gbps传输速率,且误码率<10^{-12}的无线通信系统。该系统能够



注:ECL为外腔激光器;I/Q MOD为光调制器;EDFA为掺铒光纤放大器;LO为本振光;ATT为光衰减器;PD为光电二极管。

图2 光子辅助太赫兹信号发生系统[18]

在不压缩信号的情况下,传输多达6个高清电视信号,并且保持>1 km的传输距离,并将此系统应用在北京奥运会转播[22]。

2018年,复旦大学余建军团队在110~170 GHz的波段上以光子辅助的方式传输4×4多输入多输出(multiple-input multiple-output,MIMO)技术下概率整形PS-64QAM调制的信号[23],同时使用了奈奎斯特整形和查找表预失真等数字信号处理方式提高系统性能,信号传输距离为3.1 m,传输速率为1.056 Tbps,且误码率<4×10^{-2}。

1.1.3 全光子学太赫兹通信系统

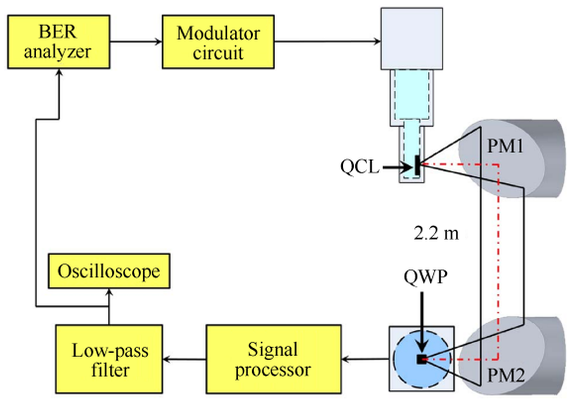
基于全光子学的太赫兹通信系统利用量子级联激光器产生信号。该激光器工作原理基于电子在量子阱结构中的级联跃迁。当电子从一个量子阱跃迁到另一个量子阱时,会产生光子,进而发射激光。激光的波长取决于量子阱的厚度和组成,可以通过精确控制半导体层的参数来定制激光的特定波长,具有可调谐、高功率以及可高度集成化的优点。但量子级联激光器通常需要在极低温度下工作,且成本高昂以及较为复杂的工艺设计,这大大限制了全光子学太赫兹通信系统的实用性[24]。

2009年,加拿大国家研究委员会微结构研究所Grant等[25]使用太赫兹量子级联激光器和太赫兹量子阱探测器分别作为发射机和接收机,在3.8 THz工作频率下,实现了在2 m的房间内传输音频信号,其得到的光电探测器载流子强度是测量噪声水平的100倍。

2015年,中国科学院上海微电子研究所曹俊诚团队使用工作频率为3.27 THz的太赫兹量子级联激光器,如图3所示[26]。量子级联激光器和量子阱探测器频谱匹配度达94%,量子阱探测器的光采集效率大大提高,在2.2 m的传输距离内,该系统实现了<10^{-8}的误码率和>20 Mbps的数据传输速率。

1.2 太赫兹信号接收

太赫兹信号的接收方式主要分为直接检测和相干检测2种,二者在太赫兹通信系统中有着各自



注:BER为误码率;QCL为量子级联激光器;QWP为量子阱探测器;PM1与PM2为离轴抛物面反射镜。

图3　太赫兹量子级联激光器和太赫兹量子阱探测器音频通信链路[26]

的优缺点。

在直接检测中,通过信道传输太赫兹波的功率或强度,太赫兹信号经过天线接收后,直接输入到二极管检测器中进行包络检测,然后转化为电信号,电信号可以进一步被放大和处理以恢复传输的信息,具体结构如图4所示。直接检测技术不需要振荡器和混频器,技术实现相对简单,并且成本较低。但是灵敏度不如相干检测,无法利用相位等有效信息,只能实现低阶的幅度调制,对于高阶调制方式如QAM的适用性较差。

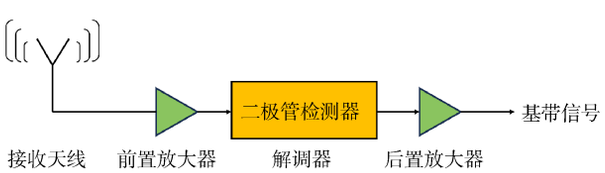


图4　直接检测示意

相干检测涉及测量太赫兹波的振幅和相位,通常需要1个本地振荡器(local oscillator,LO)产生1个参考信号。通过将接收到的信号与本地振荡器的信号混合,可以提取信号的相位和幅度信息。这允许接收器恢复信号的完整信息,包括其携带的数据,具体结构如图5所示。相干检测提供了更高的接收灵敏度和信噪比,从而能够接收更弱的信号;由于能够提取信号的相位信息,相干检测支持更复杂的调制技术,如相位调制和正交幅度调制,从而提高数据传输速率。但是其需要精确的本地振荡器和同步机制,增加了系统的复杂性和成本,并且可能会受到本地振荡器相位噪声的影响。

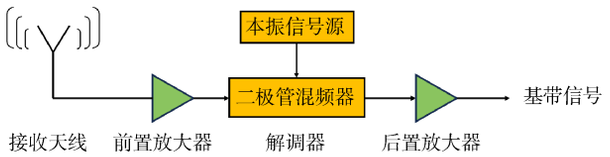


图5　相干检测示意

1.3　太赫兹波传播特性

对太赫兹无线通信系统而言,深入研究信号传播特性和太赫兹信号损耗至关重要。通过持续的技术创新和优化,预计未来的太赫兹无线通信系统将能够有效应对路径损耗带来的挑战,实现高速、长距离和可靠的数据传输。

大气环境下太赫兹传输路径损耗主要分为大气吸收、自由空间路径损耗和杂项损耗3个部分。其中杂项损耗主要是由物质沿着传播路径的反射和散射引起的,本文只考虑视距路径(line of sight,LOS),暂时不考虑杂项损耗[8]。

大气中的气体分子或水分子的振动或转动自由度,可以与传播的太赫兹波相互作用。这种振动和转动会吸收和散射太赫兹波的能量,从而导致太赫兹波的衰减。因此即使在晴朗的大气条件下,太赫兹波也会受到大气中分子的振动和转动能级的影响。由于大气吸收对于太赫兹信号传输的重要影响,很多研究者致力于此领域的研究,并取得了诸多成果,构建了多个模拟大气吸收损耗的模型,如毫米波传播模型[27]、微波大气透射模型[28]、大气模型[29]和国际电联无线电通信P676-12模型(International Telecommunication Union Radio Communication Sector P676-12 Model,ITU-R P676-12)[30],这些模型在太赫兹无线通信系统设计以及优化中发挥了极大的作用。虽然目前模型很多,并且各有所长,但至今还未有一个统一的通用模型来准确描述太赫兹信号在大气中的衰减。根据ITU-R P676-12建议书的数据,图6中蓝色线段显示了0~1 000 GHz频段无线电波因大气吸收而产生的衰减,此时,气压为1 013 hPa,温度为15 ℃,以及水汽密度为7.5 g/m。根据这些数据,可以观察到太赫兹频段具有多个传输窗口,即2个水汽吸收峰之间的频率范围可以用于信号传输,具体中心频段为0.85、0.67、0.48、0.40、0.34、0.24和0.14 THz。

在通信领域,自由空间路径损耗是指电磁波在自由空间的视距路径上产生的信号强度损失[31]。根据Friis公式计算太赫兹波自由空间路径损耗的表达式为

$$L_{\mathrm{FSdB/km}} = 32.4 + 20\log f_{\mathrm{MHz}} + 20\log d_{\mathrm{km}} - G_{\mathrm{TxdBi}} - G_{\mathrm{RxdBi}}, \quad (1)$$

式中:$L_{\mathrm{FSdB/km}}$表示自由空间路径损耗;f_{MHz}表示电磁波频率(以MHz为单位);d_{km}表示通信距离(以km为单位);G_{TxdBi}表示发射天线增益(以dBi为单位);G_{RxdBi}表示接收天线增益(以dBi为单位)。根据式(1)可知,自由空间路径损耗与发射器和接收器之间距离的平方成正比,也与无线电信号频率的平方成正比。当设定天线之间距离为1 km,发射和接收天线的天线增益均为40 dBi。依据ITU-R P676-12模型绘制的3种路径损耗系数与频率关系如图6所示[30,32]。图中的黑色线段是其自由空间路径损耗,红色线段是大气吸收损耗与自由空间路径损耗叠加下的总路径损耗。因此,除了谐振区域的强衰减之外,如果天线增益太低,自由空间路径损耗将成为主要因素。

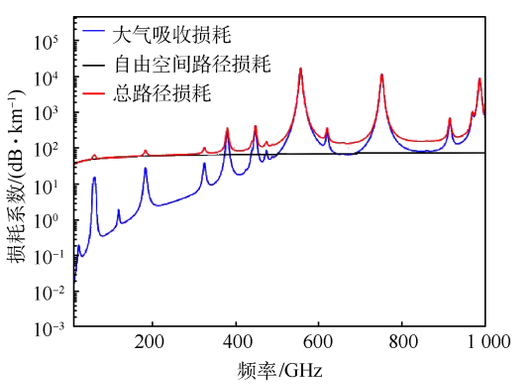


图6 3种路径损耗系数与频率关系[30,32]

1.4 太赫兹信道建模

太赫兹信道建模目前主要分为确定性信道建模、统计性信道建模以及混合型信道建模3种[33]。

确定性信道建模是指其特性是固定不变的,即在给定的条件下,信道对信号的影响是可预知且可重复的。在这种模型下,信道的衰减、多径效应和时延扩展等特性可以通过精确的物理过程来准确计算。其优势在于可以非常精确地描述和预测信号在信道中的传播情况,并且可重复性很高。但由于现实环境是多变的,充斥着不确定性,且计算复杂度较高,确定性信道建模在现实中具有很大局限性[34-35]。

统计性信道建模是基于概率和统计理论来描述信道的。在这种模型中,信道的特性(如衰减、多径效应等)是随机变量,通常根据测量得到的统计特性来定义。统计性信道模型通过概率分布函数来描述信号的接收情况,而不是一个具体的传输路径。由于考虑到环境的随机性,使用了统计模型,利用概率来简化计算复杂度,更符合现实信号传播。但由于目前无法捕捉所有环境细节,只是平均意义上的预测,也有很大的不足[36-37]。

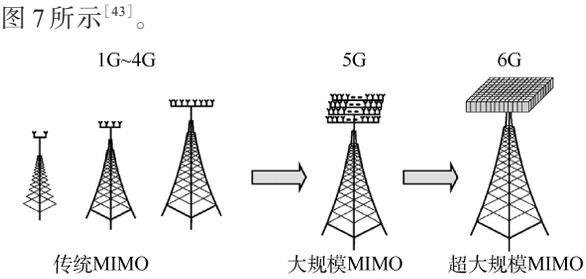
混合型信道建模是将确定性信道和统计性信道模型相结合的一种方式,这种模型试图融合确定性模型的准确性和统计性模型通用性的优点。使用确定性的方法来模拟已知的、稳定的物理环境特征,如墙壁、建筑物的反射和散射,同时使用统计性模型来描述一些随机变化的环境因素,如人群移动引起的遮挡、信号衰减的随机变化,以及由气象条件变化引起的信道状态波动。在保持信道模拟精确性的同时又添加了对动态和随机特征的处理能力,并提高了计算效率,可以更加贴合现实环境[38-39]。

2 太赫兹无线通信关键技术及挑战

2.1 超大规模MIMO技术

超大规模MIMO技术是一种无线通信技术,使用了大量的发射和接收天线来同时服务多个用户。经过10多年的发展,大规模的MIMO技术已经趋于成熟,并且随着5G技术的快速发展,开始了大规模的商用。但随着移动设备用户数的激增和数据密集型应用的普及,如高清视频流、万物互联、增强现实和虚拟现实等诸多产业,大规模的MIMO技术已经不能满足未来无线通信系统对高速率、高容量、高效率和低延迟的需求。

相较于4G通信系统中的4或8根天线,在5G技术中应用的大规模MIMO技术在数量上增加了一个量级以上,达到了数十乃至数百根天线。超大规模MIMO技术作为大规模MIMO技术在维度上的进一步升级,通过成百上千的天线阵列并发使用服务更多用户,并在空间上完成多路复用,在同一时间上传输更多数据,大幅度提升系统容量以及频率效率[40-42]。MIMO技术伴随移动通信更新发展如图7所示[43]。



注:MIMO表示多入多出。

图7 MIMO技术升级对比[43]

太赫兹波段在传输过程中具有显著的路径损耗,同时现阶段太赫兹收发器的接收能力受限,这些因素共同对太赫兹无线通信的传输距离构成了不小的挑战。超大规模MIMO技术能够在不增加发射功率的前提下,利用成排的天线阵列经过精准的信号加权和相位控制,实现方向性极佳的波束成形。这种方法不仅显著增强了发射和接收天线的增益,有效降低了路径损耗对太赫兹波传输的不利影响,还拓展了信号的覆盖范围,增加了通信距离。通过高效的算法,系统可以动态地调整波束的形状,以适应多变的通信环境,极大地提升了移动场景以及非视距条件下的通信稳定性和可靠性。此外,由于通信方向性的增强,还减轻了能量在非目标方向上的损耗,提高了通信系统的能量效率[44-48]。

由于载波波长的平方与天线尺寸成正比,4G和5G通信系统中较长的波长导致了相应天线的体积也较大。因此,在有限的空间内部署大规模天线阵列便面临着较大的挑战,这限制了MIMO技术规模的扩展。相对而言,太赫兹波段所具有的较短波长允许天线尺寸显著缩小,这为在相同体积的空间内集成更多的天线阵列提供了可能。特别是通过利用纳米材料和超材料的独特属性,可以在微小的空间内开发太赫兹等离子体天线阵列。例如,在1 THz的频率下,在仅有1 mm²的空间里就可以集成高达1 024个天线阵列单元,这为实现超大规模MIMO技术提供了巨大的潜力和可能性[41]。

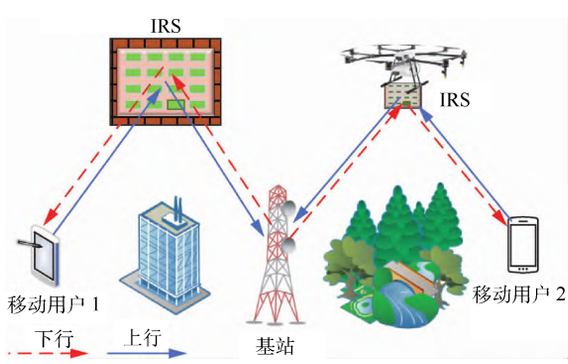
尽管超大规模MIMO技术可以极大地促进太赫兹通信系统的发展,但也带来了不小的挑战。随着天线单元数量的增加,有效地对这些单元进行分组和控制的任务需要复杂的信号处理和适当的算法来确保阵列中的每个单元都能同步工作。天线数量的增多意味着更高的能耗,尽管太赫兹通信天线单元的体积小,但是大量集成的天线单元总体的能量消耗仍是一个重要的考虑因素。信道估计是超大规模MIMO系统的关键部分,但随着天线数量的激增,信道估计的复杂性也在增加。更高的频率导致信号衰减得更快,且信道条件可能非常动态,需要开发更加复杂的信道估计和跟踪算法[46]。

2.2　智能反射面

智能反射面(intelligent reflecting surfaces,IRS)技术是由大量的可控反射单元组成,可以调整入射电磁波的相位和振幅,从而实现对波的智能控制,以在不发射任何自身信号的情况下间接增强通信系统的传输性能,具有低功耗、低成本和低复杂度的特点。这不是传统意义上的信号中继器,因为其不对信号进行再生或放大,只是通过调整无线信号的传播特性来实现优化通信效果。这种能力使得IRS成为非常有前景的下一代无线网络技术,尤其是在实现高频率、大容量的通信系统中。与MIMO技术不同,IRS可以采用无源的发射机来完成对信号相位调整,达到增强信号强度的目的,从而大幅度降低系统能耗,实现太赫兹绿色通信[49-52]。

此外,由于IRS体积小巧且质量较轻,具有极强的灵活性以及兼容性,可以轻易地应用在室内以及室外通信场景,有效解决障碍物堵塞信号传输、小区边缘通信盲区以及通信热点地区信号薄弱问题[53-54]。

IRS还可以与无人机结合使用,无人机携带IRS在三维空间中移动,作为动态的智能反射站点,可以根据地面用户的分布和需求调整其位置,以实现最佳的信号覆盖。凭借无人机的高机动性,可以快速移动并且位置灵活,二者搭配可以形成一个多层次、全方位覆盖的无线网络,在障碍物阻碍以及抢险救灾等方面发挥重要作用[55-56]。图8为二者结合在无线通信中的应用示意[57]。



注:IRS表示智能反射面。

图8　智能反射面搭配无人机无线通信示意[57]

尽管IRS是一种很有前景的技术,能够提升无线通信网络的性能和效率,但也面临一些局限性和挑战。目前,IRS的设计和实施策略仍在研究之中,要实现其广泛应用还有很长的路要走。精确控制大量反射单元需要复杂的算法和计算资源,尤其是在动态环境中,开发高效的信号处理和优化算法也是一个重大挑战。将IRS技术集成到现有无线网络基础设施中,需要解决标准化、接口兼容性和与现有技术的互操作性问题。

2.3　太赫兹通信核心器件

太赫兹通信技术的核心部件对实现高效的太

赫兹通信至关重要,太赫兹通信的商业化和实际应用对太赫兹核心部件的不断进步和创新有极大的依赖性。这些关键器件,包括太赫兹波发射源、探测器、调制器和专用的天线等,其技术突破和持续优化是推动太赫兹通信前进的动力[58-62]。

目前太赫兹器件面临着发射功率不足、体积较大、集成度低以及传输损耗大等问题,这导致信号传输距离有限,无法满足长距离通信需求,且器件较大的体积使得太赫兹通信系统的应用场景受到限制,较低的集成度导致太赫兹器件无法与现有的电子系统兼容,增加系统复杂度以及能耗。

尽管太赫兹通信技术具有巨大潜力,但目前科学家和工程师们在提高传输功率、器件微型化、实现高集成度和降低传输损耗等方面面临许多技术挑战。解决这些挑战将为太赫兹通信技术创新铺平道路,并促进太赫兹器件向实际应用阶段的成熟发展。

3 太赫兹通信的应用前景

太赫兹频段频率资源极其丰富,可支持超大带宽的分配,这意味着太赫兹通信将支持超高的通信速率,目前5G达到的最高带宽是毫米波高频段的几GHz的带宽,而国内外使用的太赫兹通信实验验证系统的工作带宽已经处于这个数量级上,这证明未来太赫兹通信的应用带宽将远远大于这一工作带宽,结合超大规模MIMO技术,以及太赫兹波的高速调制手段,太赫兹通信将具有超高速率的特点。

此外,根据式(1),太赫兹频段的传输损耗更大,因此在设备增益受限的情况下,太赫兹通信的覆盖距离相较5G将会明显缩短,因此室内短距离超高速通信是其重要的应用场景。

3.1 短距离超高速通信

在当前关于元宇宙概念的热烈讨论中,与元宇宙相关的沉浸式服务,如全息通信、现实增强、虚拟现实和3D触觉游戏,对通信速度、延迟、接入数和感知效果提出了极高的要求。以虚拟现实为例,虚拟现实至少需要数10 Gbps的空口速度来支持无压缩视频帧数据传输,而太赫兹通信具有大带宽和高速的特点,结合机器学习和人工智能等当前技术,可以很好满足虚拟现实的应用条件,使其成为6G时代太赫兹通信的重要应用之一。同时,太赫兹通信技术与IRS技术相结合,预计能够解决室内全覆盖问题,从而解决现实增强、虚拟现实等技术的实际应用问题[63]。未来在教育、医疗、培训和广告设计等各种场景中,以太赫兹通信为基础的现实增强和虚拟现实技术将发挥重要作用。

此外,太赫兹通信还可以作为宏观蜂窝网络的补充,形成微蜂窝网络,实现在热点区域的超高速无线通信网络覆盖。对超大带宽和超高速的支持,还使太赫兹通信能够应用于对数据吞吐量要求极高的业务需求场景,如固定无线接入和数据中心[64-65]。

3.2 空间通信

近地的太赫兹无线传播因水分子和气体分子的吸收而明显衰减,在对流层顶以上的空间中,太赫兹波的衰减程度显著降低,这使得太赫兹技术非常适用于空间通信,如星间高速通信、星地间高速通信和空间飞行器通信等。在空间通信中,太赫兹通信相比于传统的射频通信优点显著:首先是太赫兹波波长短,理论上可以做到天线尺寸更小,易于小型化和集成化,更适合用于空间通信;太赫兹波的波束更窄,安全性能高;太赫兹频段可以通过极低的功耗实现超长距离传输,且受地球的噪声影响很小。此外,高速飞行器以10倍以上音速飞行进入大气层时,飞船周围的高温高压空气会持续电离,形成等离子鞘,这种鞘体会阻断电磁波的传播,影响甚至中断飞行器与地面间通信,被称为“黑障”现象,而太赫兹波频率远超等离子体鞘层频率,可以穿透等离子体鞘,因此太赫兹技术是解决高速飞行器在“黑障区”通信问题的有效方法[66]。最后太赫兹波的高频段和超高带宽也使其能够达到较高的信息传输速率,有望在未来空间高速信息传输网络中发挥至关重要的作用,解决我国空间高速信息传输技术难题[67],成为未来6G“空天地海”一体化网络中至关重要的一环。

3.3 微尺度通信

微尺度通信是指通信距离<1 m的通信场景,包括芯片间高速无线数据传输和纳米传感器网之间的高速无线通信[68]。这是太赫兹波段的特色应用场景,因为这种短距通信可以有效减少路径损耗带来的影响。太赫兹波能很好地满足微尺度通信场景中近距离和点对点的拓扑要求,如应用于自助服务机系统。此外,太赫兹波可应用于目前流行的无线片上网络通信,这是一种在芯片多处理器设计中同时支持数百个核心互联的通信技术,太赫兹波的超宽频谱资源可以满足无线片上网络通信达到Tbps的超高速率链路的需求。太赫兹波波长与分子尺寸相近,光波能量与分子内部振动或旋转能级相互作用,

形成独特的指纹谱,用于检测并识别分子,针对物联网等流行概念,可以通过纳米传感器来监测身体状况,也可通过构造纳米传感器网络,开发更多可穿戴或植入式设备,收集用户人体数据,做到实时健康监测[69]。并且太赫兹波光子能量低,不会对细胞造成电离伤害,相较于传统伽马射线检测方法对人体更为安全。

3.4　高保密通信

太赫兹通信中敏感信息和个人数据的安全性极为重要。因此,需要采取有效的安全措施来防范数据泄露、非法监听和其他形式的潜在安全侵害。量子通信基于量子力学基本原理,利用量子态进行信息传递,为太赫兹通信提供了一种理论上绝对安全的通信方式。量子通信技术如量子密钥分发技术等,与太赫兹通信技术结合,不仅能够实现高速的数据传输,还能确保数据传输的安全性,从而极大地提高整个通信系统的性能,在国家安全、金融服务以及关键基础设施保护上具有巨大意义[3,70-71]。

本研究团队目前正致力于太赫兹连续变量量子密钥分发(continuous variable quantum key distribution,CVQKD)的相关研究。这一研究领域主要包括大气环境中CVQKD传输协议和设备无关CVQKD协议的理论探讨。通过理论推导并利用数值模拟的方法,分析了在大气环境中,有限长度效应以及最优调制方差下的太赫兹CVQKD系统的性能。考察了通信系统在2种损耗下,通过正向协调与反向协调模式进行的相干零差探测的表现。通过一系列模拟,展现了在340和900 GHz 2个关键频率点上,不同数据长度如何影响系统密钥率与传输距离的关系。

图9(a、b)展示了仅计算大气吸收损耗情况下的结果,而图9(c、d)则展示了在考虑大气吸收损耗和自由空间路径损耗叠加,并且加入天线增益影响后的模拟结果。由图9(a、b)可知,340 GHz频率下,信号拥有更高的密钥率以及更远的传输距离,且随着数据长度的提升,信号的通信质量也在明显地提升。观察图9(c、d)的模拟结果可知,在引入自由空间路径损耗后,系统的密钥率传输至某个节点时出现了断崖式下降。这是因为太赫兹无线通信中,除了上文提到的谐振区域,自由空间路径损耗明显大于大气吸收损耗。虽然天线增益在短距离传输中能够部分补偿这种损耗,但随着传输距离的增加,路径损耗迅速上升,天线尺寸较小时,天线增益无法完全弥补这种损失,从而导致密钥率的急剧下降。

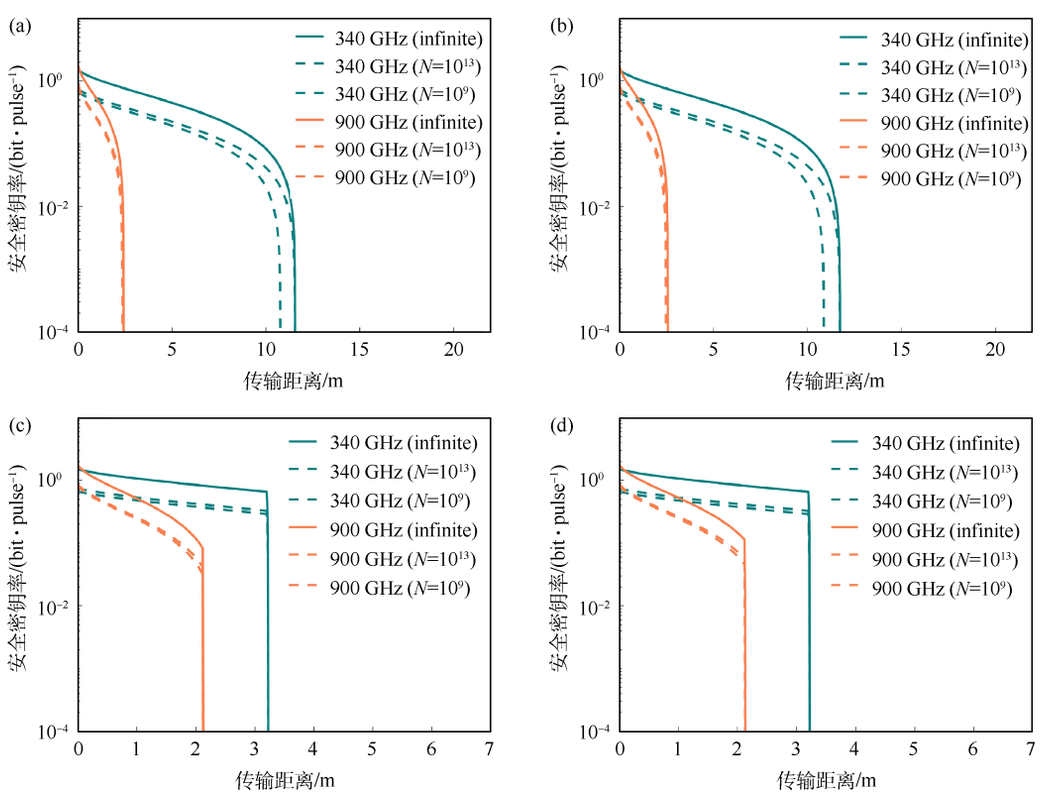


图9　太赫兹连续变量量子密钥分发(CVQKD)密钥率与传输距离关系

(a、b)大气吸收损耗下正向协调与反向协调零差探测协议密钥率与传输距离关系;(c、d)大气吸收损耗和自由空间路径损耗叠加下正向协调与反向协调零差探测协议密钥率与传输距离关系

可以通过设计合适尺寸的天线来增加安全通信距离。这一研究表明,在短距离传输场景中,太赫兹CVQKD技术能够提供有效的密钥率,展示了其在实践中的应用潜力。本团队计划依托首都师范大学太赫兹光电子教育部重点实验室,利用光子辅助通信系统,完成太赫兹CVQKD的实验验证。

4 结束语

随着信息技术的快速发展,通信速度的需求正以指数级别激增。这种对更快传输速率和更低通信延迟的追求,激发了全球研究者对太赫兹通信技术的高度关注。本文全面回顾了太赫兹通信系统的最新研究进展,深入探讨了该领域目前面临的3大技术挑战,系统地分析了太赫兹通信技术在不同应用场景中的潜力。太赫兹技术的兴起预示着未来通信领域的一次巨大变革,将深刻影响人们日常生活的方方面面。随着研究工作的持续深入和关键技术难题的逐步攻克,本文有充分的理由相信,太赫兹通信技术将在不久的将来引领全球通信网络的革命性转变,推动人类通信技术攀登新的高峰。

参 考 文 献

[1] CHEERY S. Edholm's law of bandwidth[J]. IEEE Spectrum,2004,41(7):58-60.

[2] 熊子康,武晓磊,何敬锁,等.两种310 GHz无线通信系统设计与比较[J].首都师范大学学报(自然科学版),2019,40(3):21-27.

[3] 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 Science,2021,64:110301.

[4] 中国移动通信有限公司研究院.2030+愿景与需求白皮书(第2版)[EB/OL].(2020-11-26)[2024-03-20].https://cmri.chinamobile.com/wp-content.

[5] 冯伟,韦舒婷,曹俊诚.6G技术发展愿景与太赫兹通信[J].物理学报,2021,70(24):175-189.

[6] 张存林,牧凯军.太赫兹波谱与成像[J].激光与光电子学进展,2010,47(2):1-14.

[7] ELAYAN H, AMIN O, SHIHADA B, et al. Terahertz band: the last piece of RF spectrum puzzle for communication systems[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society,2020,1:1-32.

[8] 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.

[9] MA J J, VORRIUS F, LAMB L, et al. Comparison of experimental and theoretical determined terahertz attenuation in controlled rain[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves,2015,36:1195-1202.

[10] MA J J, MOELLER L, FEDERICI J F. Experimental comparison of terahertz and infrared signaling in controlled atmospheric turbulence[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves,2015,36:130-143.

[11] MA J J, VORRIUS F, LAMB L, et al. Experimental comparison of terahertz and infrared signaling in laboratory-controlled rain[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves,2015,36:856-865.

[12] 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,2012,29:2360-2366.

[13] SU K, MOELLER L, BARAT R B, et al. Experimental comparison of performance degradation from terahertz and infrared wireless links in fog[J]. Journal of the Optical Society of America A,2012,29:179-184.

[14] IMT-2030(6G)推进组.6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[EB/OL].(2021-04-22)[2024-03-20].https://file.imt2030.org.cn/f6g/4a/fe.

[15] LI O P, HE J, ZENG K, et al. Integrated sensing and communication in 6G a prototype of high resolution THz sensing on portable device[C]//O'DONOHUE P. European Conference on Networks and Communications & 6G Summit. Porto:IEEE,2021:544-549.

[16] 赵明明,余建军.太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J].太赫兹科学与电子信息学报,2018,16(6):931-937.

[17] 熊子康,何敬锁,武晓磊,等.310 GHz太赫兹通信系统设计[J].太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(3):369-373.

[18] 马静艳,李福昌,张忠皓,等.太赫兹通信关键技术及挑战分析[J].信息通信技术,2021,15(5):39-45.

[19] JASTROW C, MUNTER K, PIESIEWICZ R, et al.300 GHz channel measurement and transmission system[C]//BUTTO K J. International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Pasadena:IEEE,2008:1-2.

[20] HAMADA H, TSUTSUMI T, MATSUZAKI H, et al.300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits,2020,55(9):2316-2335.

[21] 余建军,周雯,王心怡,等.光子辅助的宽带太赫兹通信技术[J].通信学报,2022,43(1):11-23.

[22] KUKUTSU N, HIRATA A, KOSUGI T, et al.10-Gbit/s wireless transmission systems using 120-GHz-band

photodiode and MMIC technologies [C]//SOKOLICH M. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Greensboro:IEEE,2009:1-4.

[23] LI X Y, YU J J, ZHAO L, et al. 1-Tb/s photonics-aided vector millimeter-wave signal wireless delivery at D-band [C]//BIRK M. Optical Fiber Communications Conference and Exposition. San Diego:IEEE,2018:1-3.

[24] PANG X D, OZOLINS O, ZHANG L, et al. Free-space communications enabled by quantum cascade lasers[J]. Physica Status Solidi A (Applications and Materials Science),2021,218(3):2000407.

[25] GRANT P D, LAFRAMBOISE S R, DUDEK R, et al. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. Electronics Letters,2009,45(18):952-954.

[26] GU L, TAN Z Y, WU Q Z, et al. 20 Mbps wireless communication demonstration using terahertz quantum devices [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13: 081402-081404.

[27] LIEBE H J. MPM-an atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves,1989,10:631-650.

[28] PARDO J R, CERNICHARO J, SERABYN E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter/submillimeter applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2001,49(12):1683-1694.

[29] PAINE S. The am atmospheric model[EB/OL].(2019-09-12)[2024-03-20].https://zenodo.org/records/8161272.

[30] ITU-R P.676-12. Attenuation by atmospheric gases and related effects [EB/OL]. (2019-08-14) [2024-03-20]. https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-12-201908-S/en.

[31] MACCARTNEY G R, RAPPAPORT T S, SUN S, et al. Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks [J]. IEEE Access, 2015,3:2388-2424.

[32] PORTILLO I D. A python implementation of the ITU-R P. Recommendations to compute atmospheric attenuation in slant and horizontal paths. [EB/OL]. (2023-02-05) [2024-05-06]. https://github. com/inigodelportillo/ITU-Rpy.

[33] 张绍林,王正,武岳.室内太赫兹无线信道模型研究现状[EB/OL].(2023-12-28)[2024-03-20].http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097. TN.20231227.1508.004.html.

[34] HAN C, WANG Y Q, LI Y B, et al. Terahertz wireless channels: a holistic survey on measurement, modeling, and analysis [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2022,24(3):1670-1707.

[35] POMETCU L, D'ERRICO R. Characterization of sub-THz and mmwave propagation channel for indoor scenarios [C]//HAO Y. European Conference on Antennas and Propagation. London:IEEE,2018:1-4.

[36] LIN C, LI G Y. Distance-aware multi-carrier indoor terahertz communications with antenna array selection [C]//EPHREMIDES A. International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Washington:IEEE,2014:522-526.

[37] KIM S, ZAJIC A. Statistical modeling of THz scatter channels[C]//CORREIA M L. European Conference on Antennas and Propagation. Lisbon:IEEE,2015:1-5.

[38] CHEN Y, LI Y B, HAN C, et al. Channel measurement and ray-tracing-statistical hybrid modeling for low-terahertz indoor communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2021,20(12):8163-8176.

[39] ZHANG Y, ZHAO L, HE Z W. A 3D hybrid dynamic channel model for indoor THz communications [J]. China Communications,2021,18(5):50-65.

[40] NIE S, JORNET J M, AKYILDIZ I F. Intelligent environments based on ultra-massive MIMO platforms for wireless communication in millimeter wave and terahertz bands[C]//SANEI S. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Brighton: IEEE,2019:7849-7853.

[41] AKYILDIZ I F, JORNET J M. Realizing ultra-massive MIMO (1 024×1 024) communication in the (0.06~10) terahertz band [J]. Nano Communication Networks, 2016,8:46-54.

[42] HAN C, JORNET J M, AKYILDIZ I F. Ultra-massive MIMO channel modeling for graphene-enabled terahertz-band communications [C]//CRUZ J R. Vehicular Technology Conference. Porto:IEEE,2018:1-5.

[43] 倪善金,沈亮,宁珊,等.6G无线通信物理层关键技术[J].电信科学,2023,39(12):1-18.

[44] NING B Y, TIAN Z B, MEI W D, et al. Beamforming technologies for ultra-massive MIMO in terahertz communications [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society,2023,4:614-658.

[45] HEADLAND D, MONNAI Y, ABBOTT D, et al. Tutorial: terahertz beamforming, from concepts to realizations[J]. APL Photonics,2018,3(5):051101.

[46] FAISAL A, SARIEDDEEN H, DAHROUJ H, et al. Ultramassive MIMO systems at terahertz bands: prospects and challenges [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine,2020,15(4):33-42.

[47] HAN C, YAN L F, YUAN J H. Hybrid beamforming for

terahertz wireless communications: challenges, architectures, and open problems[J]. IEEE Wireless Communications,2021,28(4):198-204.

[48] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019,14(3):28-41.

[49] WU Q Q,ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment:intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine,2020,58(1):106-112.

[50] ZHAO J. A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs):towards 6G wireless communication networks[EB/OL]. (2019-11-02)[2024-05-06]. arXiv:1907.04789, 2019.

[51] KUDATHANTHIRIGE D, GUNASINGHE D, AMARASURIYA G. Performance analysis of intelligent reflective surfaces for wireless communication[C]// GANLEY D. International Conference on Communications. Dublin:IEEE,2020:1-6.

[52] BASAR E, YILDIRIM I. Reconfigurable intelligent surfaces for future wireless networks:a channel modeling perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(3):108-114.

[53] MA X Y,CHEN Z,CHEN W J,et al. Joint channel estimation and data rate maximization for intelligent reflecting surface assisted terahertz MIMO communication systems[J]. IEEE Access,2020,8:99565-99581.

[54] ZOU Y Z, GONG S M, XU J, et al. Wireless powered intelligent reflecting surfaces for enhancing wireless communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(10):12369-12373.

[55] MA D, DING M, HASSAN M. Enhancing cellular communications for UAVs via intelligent reflective surface[C]//BAHK S. Wireless Communications and Networking Conference. Seoul:IEEE,2020:1-6.

[56] WEI Z Q, CAI Y X, SUN Z, et al. Sum-rate maximization for IRS-assisted UAV OFDMA communication systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2021,20(4):2530-2550.

[57] 朱政宇,王梓晅,徐金雷,等.智能反射面辅助的未来无线通信:现状与展望[J].航空学报,2022,43(2):203-217.

[58] AKYILDIZ I F, HAN C, HU Z, et al. Terahertz band communication: an old problem revisited and research directions for the next decade[J]. IEEE Transactions on Communications,2022,70(6):4250-4285.

[59] 王波,张岩.太赫兹超材料和超表面器件的研发与应用[J].太赫兹科学与电子信息学报,201,13(1):1-12+18.

[60] ZHANG P J, CAI T, ZHOU Q L, et al. Ultrahigh modulation enhancement in all-optical Si-based THz modulators integrated with gold nanobipyramids[J]. Nano Letters,2022,22(4):1541-1548.

[61] ZHANG P J, LIANG Q H, ZHOU Q L. et al. High-performance terahertz modulators induced by substrate field in Te-based all-2D heterojunctions[J]. Light-Science & Applications,2024,13(3):67.

[62] ZHANG P J,HAO X,ZHOU Q L,et al. Dynamic large-array terahertz imaging display based on high-performance 1D/2D tellurium homojunction modulators[J]. APL Photonics,2024,9(3):031301.

[63] 徐梓丞.无线通信应用太赫兹技术研究进展[J].微电子学,2022,52(3):351-357.

[64] MOLLAHASANI S, ONUR E. Evaluation of terahertz channel in data centers[C]//OKTUG S. Network Operations and Management Symposium. Istanbul: IEEE,2016:727-730.

[65] 马静艳,张忠皓,李福昌,等.太赫兹通信应用与产业化发展分析[J].移动通信,2023,47(5):2-6.

[66] 张博淮,郭凯.太赫兹技术在军事应用领域内的发展与潜力[J].航空兵器,2022,29(5):28-34.

[67] FEDERICI J F, MA J. Comparison of terahertz versus infrared free-space communications under identical weather conditions[C]//SIEGEL H P. International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. Tucson:IEEE,2014:1-3.

[68] 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,2019,5(1):30-43.

[69] SHARMA S, DEKA K, BHATIA V. Thresholdless detection of symbols in Nano-communication systems[J]. IEEE Transactions on NanoBioscience, 2020, 19(2):259-266.

[70] LIAO S K, CAI W Q, LIU W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Nature,2017,549: 43-47.

[71] DENG F G, LONG G L. Secure direct communication with a quantum one-time pad[J]. Physical Review A, 2004,69:052319.

(责任编辑:兰丽丽)