

面向 6G 的太赫兹通信信道建模与仿真分析

周涛

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 随着第六代移动通信技术(6G)研发进入全面冲刺阶段, 其对通信速率、容量、时延、连接密度等性能指标提出了远超5G的严苛要求, 而频谱资源短缺已成为制约6G发展的核心瓶颈之一。太赫兹频段(0.1-10 THz)作为尚未被充分开发的“频谱蓝海”, 凭借其丰富的频谱资源、超高传输速率、极低时延等独特优势, 成为6G通信系统实现“通感算智”一体化、空天地一体化通信的关键核心技术。信道作为通信系统的基础载体, 其特性直接决定了通信系统的性能上限, 而太赫兹信道受频率特性影响, 呈现出路径损耗剧烈、大气吸收显著、分子吸收噪声突出、多径效应复杂等独特特征, 与传统移动通信频段信道存在本质差异, 传统信道建模方法已无法满足太赫兹通信系统设计与优化的需求。因此, 开展面向6G的太赫兹通信信道建模与仿真分析研究, 具有重要的理论意义和工程应用价值。本文首先系统阐述了6G通信的发展背景与核心需求, 明确了太赫兹通信在6G中的关键战略地位, 以及信道建模与仿真分析对太赫兹通信技术落地的重要支撑作用; 其次, 深入剖析了太赫兹通信信道的核心特性, 包括传播特性(路径损耗、反射与散射、衍射)、大气吸收特性和分子吸收噪声特性, 明确了各特性的影响机制与变化规律; 然后, 分别构建了适用于太赫兹通信的确定性信道模型(基于射线追踪法)和统计性信道模型(基于现有模型改进优化), 详细阐述了模型的构建原理、实现步骤和参数设置方法; 接着, 基于MATLAB、CST Microwave Studio等主流仿真工具, 搭建太赫兹通信信道仿真平台, 合理设置仿真参数, 对路径损耗、多径效应、信道容量等关键指标进行仿真分析, 验证所构建信道模型的准确性与有效性; 最后, 总结本文的主要研究成果, 分析研究过程中存在的不足, 提出相应的改进方向, 并对6G太赫兹通信的未来发展前景进行展望, 为后续太赫兹通信信道建模与6G系统设计提供理论参考和技术支撑。

关键词: 6G通信; 太赫兹频段; 信道建模; 射线追踪法; 统计性信道模型; 仿真分析

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 3106-2709(2025)02-0001-13

DOI: 10.62022/NCAR.issn3106-2709.2025.02.001

Channel Modeling and Simulation Analysis of Terahertz Communication for 6G

Zhou Tao

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: With the research and development of the sixth generation of mobile communication technology (6G) entering the full sprint stage, it puts forward more stringent requirements on performance indicators such as communication rate, capacity, delay, and connection density than 5G. The shortage of spectrum resources has become one of the core bottlenecks restricting the development of 6G. As an underdeveloped "spectrum blue ocean", the terahertz band (0.1-10 THz) has become a key core technology for 6G communication systems to achieve "integrated communication, sensing, computing and intelligence" and space-air-ground integrated communication, relying on its unique advantages such as abundant spectrum resources, ultra-high transmission rate, and extremely low delay. As the basic carrier of the communication system, the channel characteristics directly determine the upper limit of the communication system performance. Affected by frequency characteristics, the terahertz channel presents unique characteristics such as severe path loss, significant atmospheric absorption, prominent molecular absorption noise, and complex multipath effects, which are essentially different from the channels of traditional mobile communication frequency bands. Traditional channel modeling methods can no longer meet the needs of the design and optimization of terahertz communication systems. Therefore, carrying out research on channel modeling and simulation analysis of terahertz communication for 6G is of great theoretical significance and engineering application value. This paper first systematically elaborates on the development background and core needs of 6G communication, clarifies the key strategic position of terahertz communication in 6G, and the important supporting role of channel modeling and simulation analysis for the landing of terahertz communication technology; secondly, it deeply analyzes the core characteristics of terahertz communication channels, including propagation characteristics (path loss, reflection and scattering, diffraction), atmospheric absorption characteristics and molecular absorption noise characteristics, and clarifies the influence mechanism and

作者简介: 周涛, 博士, 讲师, 研究方向为毫米波通信。

variation law of each characteristic; then, it constructs deterministic channel models (based on ray tracing method) and statistical channel models (based on improvement and optimization of existing models) suitable for terahertz communication, and details the construction principle, implementation steps and parameter setting methods of the models; then, based on mainstream simulation tools such as MATLAB and CST Microwave Studio, a terahertz communication channel simulation platform is built, simulation parameters are reasonably set, and key indicators such as path loss, multipath effect and channel capacity are simulated and analyzed to verify the accuracy and effectiveness of the constructed channel models; finally, the main research achievements of this paper are summarized, the deficiencies in the research process are analyzed, the corresponding improvement directions are proposed, and the future development prospect of 6G terahertz communication is prospected, providing theoretical reference and technical support for subsequent terahertz communication channel modeling and 6G system design.

Keywords: 6G communication; terahertz band; channel modeling; ray tracing method; statistical channel model; simulation analysis

1 引言

进入21世纪以来,移动通信技术经历了从2G到5G的快速迭代,每一代技术的升级都深刻改变了人类的生产生活方式,推动了社会数字化、智能化的发展进程。2G实现了语音通信的普及,3G开启了移动互联网的序幕,4G支撑了短视频、移动支付等新业态的爆发,5G则聚焦于“万物互联”,在工业互联网、智慧医疗、自动驾驶等领域实现了初步应用。然而,随着人工智能、大数据、物联网、元宇宙等新兴技术的快速发展,现有5G通信系统在速率、容量、时延、连接密度等方面的局限性日益凸显,无法满足未来社会对超高速、低时延、广连接、高可靠通信的需求。在此背景下,第六代移动通信技术(6G)应运而生,成为全球科技竞争的核心领域,各国纷纷加大研发投入,抢占6G技术制高点^[1]。

太赫兹通信作为6G的核心关键技术之一,凭借其独特的频谱优势和传输性能,成为突破5G性能瓶颈、实现6G愿景的重要支撑。与传统移动通信频段相比,太赫兹频段拥有极为丰富的频谱资源,其可用带宽远超现有所有移动通信频段之和,能够实现每秒数十G甚至上百G的超高速数据传输,可有效解决频谱资源短缺的问题。同时,太赫兹波的波长极短,能够实现天线的小型化、集成化,便于构建大规模天线阵列,提升通信系统的空间复用能力和抗干扰性能。此外,太赫兹通信还具有时延低、保密性强等优势,在车联网、远程医疗、空天地一体化通信等场景中具有广阔的应用前景。

信道是通信系统中信号传输的载体,其特性直接影响信号的传输质量和系统的整体性能。太赫兹信道由于频率极高,呈现出与传统频段信道截然不同的特性,如路径损耗随频率的平方急剧增加、大气中水蒸气和氧气对信号的吸收显著、分子吸收噪声突出、多径效应复杂且易受环境影响等。这些独特特性使得太赫兹信道建模面临巨大挑战,传统的信道建模方法已无法准确描述太赫兹信号的传播规律,难以满足太赫兹通信系统设计、性能评估和优化的需求^[2]。因此,

开展太赫兹通信信道建模与仿真分析研究,准确刻画太赫兹信道的传播特性,构建高精度的信道模型,通过仿真分析验证模型的有效性和实用性,对于降低太赫兹通信系统的研发成本、加速技术成熟、推动6G太赫兹通信技术的落地应用具有重要的意义。

本文围绕面向6G的太赫兹通信信道建模与仿真分析展开深入研究,系统梳理太赫兹信道的核心特性,构建适用于太赫兹通信的确定性和统计性信道模型,通过仿真分析验证模型的准确性,为6G太赫兹通信系统的设计与优化提供理论支撑和技术参考。本章将首先阐述6G通信的发展背景与核心需求,明确太赫兹通信在6G中的关键地位,然后说明信道建模与仿真分析的重要意义,为后续章节的研究奠定基础。

1.1 6G通信发展背景与需求

随着全球数字化转型的深入推进,人工智能、大数据、物联网、元宇宙、具身智能等新兴技术的快速崛起,人类社会正逐步进入“智能互联”时代,对移动通信技术提出了前所未有的高要求。现有5G通信系统虽然在速率、时延、连接密度等方面较4G有了显著提升,但面对未来超高清视频、全息通信、车联网、远程手术、空天地一体化通信等新兴应用场景,仍存在诸多不足,无法满足“万物智联”的发展需求。在此背景下,6G通信技术应运而生,成为支撑未来社会智能化发展的核心基础设施,其研发与应用已成为全球科技竞争的焦点。

从全球发展格局来看,各国纷纷将6G研发提升至国家战略层面,加大研发投入,布局技术研发和标准制定。中国、美国、欧盟、日本、韩国等国家和地区先后出台了6G发展规划,明确了6G的研发目标和重点方向。我国工信部正式宣布,已顺利完成6G第一阶段技术试验,累计形成超300项关键技术储备,并全面启动第二阶段试验工作,标志着我国6G研发从单点技术验证,正式转向系统方案集成与原型验证的关键阶段,为2030年商用夯实基础^[3]。3GPP在2025年3月举行首次6G标准研讨会,标志着6G标准化新征程全面开

启，按照计划，2029年6G标准的第一个版本将会冻结，助推6G在2030年正式开启规模商用。6G已成为全球新一轮科技革命和产业变革的核心竞逐领域，其发展水平直接关系到一个国家的科技实力、经济竞争力和国家安全。

6G通信并非简单的5G技术升级，而是通信范式的根本性变革，承载着培育万亿元级产业集群、推动社会数智化深度转型的重要使命。与5G相比，6G的优势并非单一维度的速率提升，而是全方面迭代。业界有个形象的比喻，过去30年，通信干的活本质上是“快递员”：2G送文字，3G送图片，4G送视频，5G送高清视频和物联网数据，但6G要干的事，相当于把“快递小哥”直接升级成“管家+秘书+智囊团”。根据国际电信联盟发布的6G愿景，一方面6G将在峰值速率、频谱效率、连接能力、时延表现等方面显著增强，另一方面还将引入空天地一体、感知一体、通信和AI融合等一系列革命性的新能力，推动通信从“单一传输”向“综合服务”转型。具体而言，6G通信的核心需求主要体现在以下几个方面：

一是超高速率需求。随着超高清视频、全息通信、沉浸式体验、大数据传输等应用的普及，用户对通信速率的需求呈现指数级增长。5G的峰值速率可达10 Gbps，而6G需要实现100 Gbps至1 Tbps的峰值速率，甚至更高，能够支持8K/16K超高清视频实时传输、全息投影实时交互等场景，让用户实现“无延迟”的沉浸式体验。例如，未来的全息通信需要将人物的三维影像实时传输到异地，这需要极高的传输速率作为支撑，只有6G的超高速率才能满足这一需求。此外，在工业互联网场景中，大规模设备的数据实时采集和传输、远程控制等也需要超高速率的通信支撑，以确保生产过程的高效、精准^[4]。

二是超大容量需求。随着物联网技术的快速发展，未来将有海量的设备接入通信网络，包括智能终端、传感器、智能家电、工业设备、交通工具等，形成“万物互联”的格局。5G的连接密度可达100万个/平方公里，而6G需要实现1000万个/平方公里以上的连接密度，能够支撑海量设备的同时接入，满足物联网规模化发展的需求。例如，在智慧城市场景中，道路上的交通摄像头、路灯、井盖、智能车辆等设备都需要接入网络，实现数据的实时传输和交互，这就需要6G具备超大容量的通信能力，确保所有设备能够稳定、高效地连接^[5]。

三是极低时延需求。在车联网、远程医疗、工业控制等关键场景中，时延是决定系统性能和安全性的核心指标。5G的端到端时延可达1毫秒，而6G需要实现亚毫秒级的时延

（如0.1毫秒以下），能够支持自动驾驶的实时决策、远程手术的精准操作、工业机器人的实时控制等场景。例如，自动驾驶汽车需要实时获取周围环境的信息，并快速做出决策，时延过高会导致交通事故的发生；远程手术中，医生的操作指令需要实时传输到手术机器人，时延过大会影响手术的精度和安全性，甚至危及患者生命。因此，极低时延是6G通信的核心需求之一。

四是高可靠性需求。在一些关键应用场景中，通信的可靠性直接关系到生命财产安全和社会稳定，如远程医疗、应急通信、工业控制等。6G需要实现99.9999%以上的可靠性，确保信号传输的稳定、无误，即使在复杂的环境中（如恶劣天气、强干扰、信号遮挡等），也能保证通信的正常进行。例如，在应急通信场景中，当地震、洪水等自然灾害发生时，传统通信网络可能会受到破坏，而6G通信需要具备较强的抗干扰能力和自愈能力，确保救援指令的及时传输和救援工作的顺利开展。

五是广域覆盖需求。未来6G通信需要实现全球范围内的无缝覆盖，包括陆地、海洋、天空、太空等各个区域，打破现有通信网络的覆盖局限，实现“空天地一体化”通信。现有5G通信主要覆盖陆地城市区域，而海洋、沙漠、偏远地区等区域的覆盖能力较弱，6G需要通过卫星通信、高空平台通信等技术，结合地面通信网络，构建空天地一体化的通信网络，实现全球范围内的无缝覆盖，满足航海、航空、偏远地区通信等需求^[6]。例如，在航海场景中，船舶需要实时获取气象信息、导航信息等，6G的广域覆盖能力能够确保船舶在海洋上的任何位置都能实现稳定通信；在航空场景中，飞机需要与地面控制中心保持实时通信，确保飞行安全，6G的广域覆盖能够满足这一需求。

六是通感算智一体化需求。6G将突破传统通信的单一功能，实现通信、感知、计算、智能的深度融合，成为“通感算智”一体化的综合服务网络。通过通信与感知的融合，6G能够实现对周围环境的实时感知，如物体的位置、速度、形状等信息的采集，为自动驾驶、智慧安防、环境监测等场景提供支撑；通过通信与计算的融合，6G能够实现边缘计算与云计算的协同，将计算资源下沉到边缘节点，降低时延，提升数据处理效率；通过通信与智能的融合，6G能够实现网络的自主优化、自主运维、自主决策，提升网络的智能化水平，满足不同用户的个性化需求。行业专家普遍认为，6G从一出生，就自带AI基因，而智能内生的6G网络将更好地推动智能时代全方位升级^[7]。AI的融入不仅能让这张网络具备自主学习、智能调度、精准服务的能力，也将助力运营商

走出“管道商”的困境,实现商业模式的创新变革。

此外,6G还需要满足绿色低碳、高安全性、高灵活性等需求。绿色低碳是全球可持续发展的要求,6G通信系统需要降低能耗,提高能源利用效率,实现绿色通信;高安全性是保障用户隐私和数据安全的关键,6G需要具备强大的加密技术和抗攻击能力,防止数据泄露和网络攻击;高灵活性是适应不同应用场景需求的基础,6G需要具备灵活的频谱分配、网络架构和业务适配能力,能够根据不同场景的需求,动态调整网络参数和业务模式^[8]。

面对上述6G通信的核心需求,现有移动通信技术已无法满足,必须寻求新的技术突破。太赫兹通信作为一种新型的通信技术,凭借其丰富的频谱资源、超高速率、极低时延、高带宽等独特优势,成为实现6G核心需求的关键技术,能够有效突破现有技术的瓶颈,支撑6G通信系统的发展。因此,深入研究太赫兹通信技术,构建高精度的太赫兹信道模型,开展仿真分析,对于推动6G通信技术的研发和应用具有重要的意义。

1.2 太赫兹通信在6G中的关键地位

太赫兹波是指频率在0.1–10 THz之间的电磁波,其频段位于毫米波与红外波之间,是一种尚未被充分开发利用的“频谱蓝海”。与传统移动通信频段(如Sub-6 GHz、毫米波频段)相比,太赫兹频段具有独特的物理特性和通信优势,能够有效满足6G通信的超高速率、超大容量、极低时延等核心需求,在6G通信系统中占据着不可替代的关键地位,成为6G技术的核心支撑之一。

首先,太赫兹频段拥有极为丰富的频谱资源,能够有效解决6G频谱资源短缺的问题。随着移动通信技术的快速发展,现有Sub-6 GHz、毫米波频段的频谱资源已被充分利用,频谱拥堵问题日益严重,成为制约通信速率和容量提升的核心瓶颈。而太赫兹频段的可用带宽远超现有所有移动通信频段之和,其带宽可达数百GHz甚至上THz,能够为超高速率、超大容量通信提供充足的频谱支撑。例如,0.1–10 THz频段的可用带宽约为现有移动通信频段总带宽的1000倍以上,能够实现每秒数十G甚至上百G的超高速数据传输,满足6G超高速率的需求。此外,太赫兹频段的频谱资源尚未被充分分配和利用,具有广阔的开发空间,能够为6G通信系统的长期发展提供充足的频谱保障。

其次,太赫兹通信能够实现超高速率传输,是支撑6G超高速率需求的核心技术。通信速率与频谱带宽成正比,太赫兹频段的超大带宽使得其能够实现远超现有通信技术的传输速率。现有5G通信的峰值速率可达10 Gbps,而太赫兹

通信的峰值速率能够达到100 Gbps至1 Tbps,甚至更高,能够支持8K/16K超高清视频实时传输、全息通信、大数据高速传输等新兴应用场景。例如,在全息通信场景中,太赫兹通信能够将人物的三维影像实时传输到异地,实现“面对面”的实时交互,让用户获得沉浸式的通信体验;在大数据传输场景中,太赫兹通信能够快速传输海量的科研数据、医疗数据、工业数据等,提升数据处理效率,推动大数据产业的发展。此外,太赫兹通信的传输速率还能够支撑边缘计算、云计算等技术的发展,实现数据的快速上传和下载,降低时延,提升服务质量。

再次,太赫兹波的波长极短,能够实现天线的小型化、集成化,便于构建大规模天线阵列,提升通信系统的空间复用能力和抗干扰性能。太赫兹波的波长范围为0.03–3 mm,远短于传统移动通信频段的波长(如Sub-6 GHz频段的波长为50–600 mm,毫米波频段的波长为1–10 mm),因此,太赫兹天线的尺寸可以做得非常小,能够实现高度集成化。例如,一个太赫兹天线的尺寸可以达到毫米级甚至微米级,能够集成在智能终端、传感器、工业设备等小型设备上,满足物联网设备小型化、轻量化的需求。同时,小型化的天线便于构建大规模天线阵列,通过大规模天线阵列技术,能够实现信号的定向传输,提升通信系统的空间复用能力和抗干扰性能,有效解决太赫兹信号传播过程中的路径损耗问题,扩大通信覆盖范围。此外,大规模天线阵列还能够实现波束赋形、波束跟踪等功能,提升信号的传输质量和可靠性。

最后,太赫兹通信具有极低的传输时延,能够满足6G极低时延的需求。时延主要由信号传输时延、处理时延和排队时延组成,其中信号传输时延与传输距离成正比,与传输速率成反比。太赫兹通信的超高速率使得信号传输时延大幅降低,同时,太赫兹波的传播速度与光速相同,能够进一步降低信号传输时延。此外,太赫兹通信能够实现边缘计算与云计算的协同,将计算资源下沉到边缘节点,减少数据传输的距离,降低处理时延和排队时延,实现亚毫秒级的端到端时延。这对于车联网、远程医疗、工业控制等关键场景具有重要意义,能够确保自动驾驶汽车的实时决策、远程手术的精准操作、工业机器人的实时控制等,提升系统的安全性和可靠性。

1.3 信道建模与仿真分析的意义

信道是通信系统中信号传输的载体,其特性直接决定了信号的传输质量和系统的整体性能。对于太赫兹通信系统而言,由于其频率极高,信道呈现出路径损耗剧烈、大气吸收显著、分子吸收噪声突出、多径效应复杂等独特特征,与传

统移动通信频段信道存在本质差异,传统的信道建模方法已无法准确描述太赫兹信号的传播规律。因此,开展太赫兹通信信道建模与仿真分析研究,对于太赫兹通信技术的研发、系统设计、性能评估和优化具有重要的意义,具体体现在以下几个方面:

首先,准确的信道建模是太赫兹通信系统设计的基础。太赫兹通信系统的设计包括发射机设计、接收机设计、天线设计、调制解调技术设计等多个环节,而所有这些设计环节都需要以信道特性为依据。只有准确把握太赫兹信道的传播特性,构建高精度的信道模型,才能合理设计系统的各项参数,确保系统能够满足6G通信的性能需求。例如,在发射机功率设计中,需要根据信道的路径损耗特性,合理确定发射功率,既要保证信号能够稳定传输到接收端,又要避免功率过高造成的能耗浪费和干扰;在天线设计中,需要根据信道的多径效应特性,设计具有良好定向性和抗干扰能力的天线,提升信号的传输质量;在调制解调技术设计中,需要根据信道的噪声特性和失真特性,选择合适的调制解调方式,降低误码率,提升通信可靠性。如果信道模型不准确,将导致系统设计参数不合理,无法满足通信性能需求,甚至导致系统无法正常工作。

其次,信道建模与仿真分析能够为太赫兹通信系统的性能评估提供可靠的手段。太赫兹通信系统的性能评估需要考虑多种因素,如传输速率、误码率、时延、覆盖范围等,而这些性能指标都与信道特性密切相关。通过构建高精度的信道模型,利用仿真工具对系统性能进行仿真分析,能够快速、准确地评估系统在不同场景、不同参数下的性能表现,为系统的优化和改进提供依据。与实际测试相比,仿真分析具有成本低、效率高、灵活性强等优势,能够在系统实际部署之前,对系统的性能进行全面的评估,发现系统存在的问题和不足,及时进行优化和改进,避免实际部署后出现的问题,降低研发成本和风险。例如,通过仿真分析,可以评估不同频率、不同传播距离下的路径损耗对系统传输速率的影响,确定最佳的工作频率和传播距离;可以评估多径效应对系统误码率的影响,提出有效的抗多径干扰措施;可以评估大气环境对系统性能的影响,制定相应的应对策略。

再次,信道建模与仿真分析能够加速太赫兹通信技术的成熟和落地应用。太赫兹通信技术目前还处于研发阶段,面临诸多技术挑战,如器件技术不成熟、信道特性复杂、系统集成难度大等。通过开展信道建模与仿真分析研究,能够深入理解太赫兹信道的传播规律,为器件研发、系统设计、技术突破提供理论支撑,加速太赫兹通信技术的成熟。例如,

在太赫兹器件研发中,通过信道仿真分析,可以明确器件的性能需求,指导器件的设计和优化,提升器件的性能;在系统集成中,通过信道仿真分析,可以优化系统的架构和参数,提升系统的集成度和可靠性。同时,仿真分析还能够为太赫兹通信系统的实际部署提供指导,根据仿真结果,合理选择部署场景、优化网络布局,确保系统能够稳定、高效地运行,推动太赫兹通信技术的落地应用。

最后,信道建模与仿真分析能够为太赫兹通信技术的标准制定提供支撑。随着太赫兹通信技术的快速发展,其标准制定工作已提上日程。标准制定需要以大量的技术研究和测试数据为依据,而信道建模与仿真分析能够提供丰富的信道参数和系统性能数据,为标准制定提供可靠的支撑。例如,在太赫兹通信频段分配中,需要根据信道的大气吸收特性、路径损耗特性等,合理分配频谱资源,确保不同系统之间的干扰最小;在太赫兹通信协议制定中,需要根据信道的多径效应特性、噪声特性等,制定合适的编码、调制、接入等协议,确保系统的兼容性和可靠性。通过信道建模与仿真分析,能够为标准制定提供科学、准确的数据支撑,推动太赫兹通信标准的完善和统一。

2 太赫兹通信信道特性

太赫兹通信信道的特性是构建信道模型、开展仿真分析和设计通信系统的基础。与传统移动通信频段(如Sub-6 GHz、毫米波频段)相比,太赫兹频段(0.1-10 THz)具有频率极高、波长极短的特点,其信道特性呈现出显著的独特性,主要体现在传播特性、大气吸收特性和分子吸收噪声特性三个方面。其中,传播特性包括路径损耗、反射与散射、衍射等子特性,这些特性直接影响太赫兹信号的传输距离、覆盖范围和传输质量;大气吸收特性主要由大气中水蒸气、氧气等分子对太赫兹波的吸收作用引起,会显著衰减信号强度,限制通信距离;分子吸收噪声特性则是太赫兹信道特有的噪声类型,会影响信号的信噪比,降低通信可靠性。本章将系统、深入地分析太赫兹通信信道的各项特性,明确其影响机制、变化规律以及对太赫兹通信系统的影响,为后续信道模型的构建和仿真分析奠定基础。

2.1 传播特性

太赫兹波的传播特性是指太赫兹信号在空间中传播时所表现出的物理特性,主要包括路径损耗、反射与散射、衍射等。由于太赫兹波的频率极高、波长极短,其传播特性与传统频段电磁波存在显著差异,呈现出路径损耗剧烈、反射与散射复杂、衍射效应微弱等特点。这些特性直接决定了太

赫兹信号的传播距离、覆盖范围和传输质量,是太赫兹通信信道建模需要重点考虑的因素。下面将分别对路径损耗、反射与散射、衍射这三个子特性进行详细分析。

2.1.1 路径损耗

路径损耗是指电磁波在空间传播过程中,由于能量扩散、介质吸收、障碍物遮挡等因素导致的信号强度衰减,是无线通信信道最基本的特性之一。对于太赫兹通信信道而言,由于其频率极高、波长极短,路径损耗呈现出比传统频段更为剧烈的特点,成为制约太赫兹通信距离的核心因素之一。深入分析太赫兹波的路径损耗特性,明确其影响因素和变化规律,对于构建高精度的太赫兹信道模型、设计太赫兹通信系统具有重要意义。

太赫兹波在自由空间传播时,路径损耗主要由能量扩散引起,遵循自由空间路径损耗模型。自由空间路径损耗是指电磁波在无任何障碍物、无大气吸收的理想空间中传播时的能量衰减,其本质是电磁波的球面扩散,即随着传播距离的增加,电磁波的能量均匀分布在更大的球面上,导致单位面积上的能量逐渐减小,从而引起信号强度的衰减。与传统频段相比,太赫兹波的自由空间路径损耗随频率的平方急剧增加,频率越高,路径损耗越剧烈,这是太赫兹路径损耗最显著的特点。例如,在相同的传播距离下,1 THz频段的自由空间路径损耗比100 GHz频段高出约40 dB,比Sub-6 GHz频段高出约80 dB,这意味着太赫兹信号的传播距离会受到严重限制,在自由空间中,其传播距离通常只有数百米甚至数十米,远短于传统频段的传播距离。

除了频率因素外,传播距离也是影响太赫兹路径损耗的重要因素。根据自由空间路径损耗模型,路径损耗与传播距离的平方成正比,传播距离越远,路径损耗越剧烈。例如,当传播距离从10米增加到100米时,太赫兹信号的路径损耗会增加约20 dB,信号强度会衰减到原来的1/100。这就意味着,太赫兹通信系统的覆盖范围会受到传播距离的严重限制,需要通过大规模天线阵列、中继通信、波束赋形等技术来补偿路径损耗,扩大覆盖范围。

需要注意的是,自由空间路径损耗模型是基于理想条件下的假设,即无大气吸收、无障碍物遮挡、无多径效应等。而在实际应用场景中,太赫兹波的传播会受到大气吸收、障碍物遮挡、多径效应等多种因素的影响,导致实际路径损耗远大于自由空间路径损耗。例如,大气中水蒸气、氧气等分子会对太赫兹波产生显著的吸收作用,进一步衰减信号强度;建筑物、树木、车辆等障碍物会对太赫兹波产生遮挡,导致信号强度急剧衰减;多径效应会导致信号的叠加和抵

消,也会影响路径损耗的大小。因此,在构建太赫兹信道模型时,需要综合考虑自由空间路径损耗、大气吸收损耗、障碍物遮挡损耗、多径损耗等多种因素,才能准确描述太赫兹信号的路径损耗特性。

为了更清晰地理解太赫兹路径损耗的特点,下面将太赫兹频段与传统移动通信频段(Sub-6 GHz、毫米波频段)的路径损耗进行对比分析。首先,在频率特性方面,Sub-6 GHz频段的频率范围为0.7-6 GHz,其路径损耗随频率的变化相对平缓,频率每增加一倍,路径损耗增加约6 dB;毫米波频段的频率范围为30-300 GHz,其路径损耗随频率的变化比Sub-6 GHz频段更为明显,频率每增加一倍,路径损耗增加约6 dB,但由于其频率上限较低,路径损耗的绝对值相对较小;而太赫兹频段的频率范围为0.1-10 THz,其路径损耗随频率的变化极为剧烈,频率每增加一倍,路径损耗增加约6 dB,且由于其频率极高,路径损耗的绝对值远大于Sub-6 GHz和毫米波频段。例如,在传播距离为100米时,Sub-6 GHz频段(2 GHz)的路径损耗约为80 dB,毫米波频段(100 GHz)的路径损耗约为120 dB,而太赫兹频段(1 THz)的路径损耗约为160 dB,可见太赫兹频段的路径损耗远高于传统频段。

其次,在传播距离方面,Sub-6 GHz频段的传播距离较远,在无遮挡的情况下,传播距离可达数公里甚至数十公里,能够实现广域覆盖;毫米波频段的传播距离次之,在无遮挡的情况下,传播距离可达数百米,适合城市局部覆盖;而太赫兹频段的传播距离最短,在无遮挡的情况下,传播距离通常只有数百米甚至数十米,只能实现短距离覆盖。这主要是由于太赫兹波的路径损耗过于剧烈,信号能量衰减过快,导致其传播距离受到严重限制。

最后,在障碍物遮挡方面,太赫兹波的波长极短,穿透能力较弱,容易被建筑物、树木、车辆等障碍物遮挡,导致路径损耗急剧增加。而Sub-6 GHz频段的波长较长,穿透能力较强,能够穿透部分障碍物,路径损耗受遮挡的影响相对较小;毫米波频段的穿透能力介于Sub-6 GHz和太赫兹频段之间,受遮挡的影响比Sub-6 GHz频段更为明显,但比太赫兹频段要小。例如,当太赫兹信号遇到普通墙壁时,信号强度会衰减30 dB以上,甚至无法穿透墙壁,而Sub-6 GHz信号遇到普通墙壁时,信号强度衰减通常在10-20 dB之间,能够实现一定的穿透传输。

2.1.2 反射与散射

反射与散射是电磁波传播过程中的重要物理现象,也是无线通信信道多径效应的主要来源。对于太赫兹通信信道而言,由于其频率极高、波长极短,太赫兹波在传播过程中遇

到不同材质的表面、粗糙表面或多颗粒介质时,会产生显著的反射与散射现象,这些现象会影响信号的传播方向、强度和相位,进而影响太赫兹通信系统的传输质量和覆盖范围。深入分析太赫兹波的反射与散射特性,明确其影响机制和变化规律,对于构建高精度的太赫兹信道模型、理解多径效应的产生机制具有重要意义。

首先分析太赫兹波的反射特性。反射是指电磁波遇到两种不同介质的分界面时,部分电磁波会改变传播方向,返回原来的介质中,这一现象称为反射。太赫兹波的反射特性主要取决于分界面的材质、粗糙度、电磁特性以及太赫兹波的入射角度等因素。与传统频段电磁波相比,太赫兹波的波长极短,其反射特性更接近光学反射,呈现出明显的定向反射特点,即反射角等于入射角,且反射信号的强度和相位与分界面的材质和粗糙度密切相关。

不同材质表面对太赫兹波的反射特性存在显著差异,主要分为导体反射和介质反射两大类。导体表面(如金属、导电合金等)具有良好的导电性,对太赫兹波的反射系数较高,通常在0.9以上,能够将大部分太赫兹波反射回去,反射信号的强度衰减较小。例如,金属表面(如铜、铝、铁等)对太赫兹波的反射性能极佳,反射系数接近1,几乎能够将入射的太赫兹波全部反射,因此,在太赫兹通信系统中,金属材质的物体(如建筑物的金属构件、车辆的金属外壳等)会成为强反射体,产生较强的反射信号,形成多径分量。此外,导体表面的粗糙度对太赫兹波的反射特性也有一定的影响,当导体表面的粗糙度远小于太赫兹波的波长时,呈现出镜面反射特性,反射信号的方向集中,强度稳定;当导体表面的粗糙度接近或大于太赫兹波的波长时,会产生漫反射,反射信号的方向分散,强度衰减较大。

介质表面(如木材、墙壁、玻璃、塑料等)对太赫兹波的反射特性与导体表面存在显著差异,其反射系数相对较低,通常在0.1-0.8之间,部分太赫兹波会被介质吸收或穿透,只有部分波会被反射。不同介质的反射系数取决于其介电常数和磁导率,介电常数越大,反射系数越高,反射信号的强度越强。例如,玻璃的介电常数相对较高,对太赫兹波的反射系数约为0.3-0.5,能够反射部分太赫兹波;而木材的介电常数相对较低,对太赫兹波的反射系数约为0.1-0.3,反射信号的强度较弱,大部分太赫兹波会被木材吸收或穿透。此外,介质表面的粗糙度也会影响太赫兹波的反射特性,与导体表面类似,当介质表面的粗糙度远小于太赫兹波的波长时,呈现镜面反射;当粗糙度接近或大于波长时,呈现漫反射。

太赫兹波的入射角度也会对反射特性产生影响。当太赫

兹波垂直入射到分界面时,反射系数最大,反射信号的强度最强;随着入射角度的增大,反射系数逐渐减小,反射信号的强度逐渐减弱,同时,部分信号会发生折射,进入另一种介质中。当入射角度超过临界角时,会发生全反射现象,即所有入射的太赫兹波都会被反射回去,不会发生折射。全反射现象在太赫兹通信中具有一定的应用价值,例如,利用全反射原理,可以实现太赫兹波在光纤中的传输,提升传输效率和距离。

接下来分析太赫兹波的散射特性。散射是指电磁波遇到粗糙表面、多颗粒介质或不均匀介质时,部分电磁波会被分散到各个方向,这种现象称为散射。太赫兹波的散射特性主要取决于散射体的尺寸、形状、材质、分布密度以及太赫兹波的频率等因素。由于太赫兹波的波长极短,其散射特性与传统频段电磁波存在显著差异,小尺寸的散射体(如灰尘、雾滴、雨滴、雪花等)就会对太赫兹波产生显著的散射作用,导致信号强度衰减和传播方向分散。

粗糙表面的散射是太赫兹波散射的主要形式之一。当太赫兹波入射到粗糙表面时,由于表面存在微小的凸起和凹陷,会导致反射信号分散到各个方向,形成漫散射。粗糙表面的散射强度取决于表面的粗糙度和太赫兹波的频率,表面粗糙度越大,散射强度越强;频率越高,散射强度也越强。例如,墙壁、地面、树木等粗糙表面,会对太赫兹波产生显著的漫散射,导致信号强度衰减,同时,散射信号会形成多径分量,影响通信系统的传输质量。此外,粗糙表面的散射还会导致信号的相位失真,进一步影响通信可靠性。

多颗粒介质的散射也是太赫兹波散射的重要形式,常见的多颗粒介质包括灰尘、雾滴、雨滴、雪花、烟雾等。这些多颗粒介质的尺寸通常与太赫兹波的波长相当或更小,会对太赫兹波产生显著的散射作用。散射强度取决于颗粒的尺寸、分布密度、材质以及太赫兹波的频率。例如,雾滴的尺寸通常在几微米到几十微米之间,与太赫兹波的波长(0.03-3 mm)相当,会对太赫兹波产生强烈的散射,导致信号强度急剧衰减;雨滴的尺寸较大,对太赫兹波的散射作用也较强,尤其是在高频太赫兹频段,散射衰减更为显著。此外,多颗粒介质的分布密度越高,散射强度越强,信号衰减越严重。例如,在大雾天气中,雾滴的分布密度较高,太赫兹信号的散射衰减会非常严重,甚至无法实现正常通信。

太赫兹波的散射现象会对太赫兹通信系统产生多方面的影响。一方面,散射会导致信号强度衰减,降低接收端的信号功率,限制通信距离;另一方面,散射信号会形成多径分量,与直射信号叠加,产生多径效应,导致信号的幅度和

相位失真,增加误码率,降低通信可靠性。此外,散射还会导致信号的传播方向分散,影响波束赋形和波束跟踪的效果,进一步降低通信系统的性能。例如,在城市环境中,建筑物的粗糙表面、树木、车辆等会对太赫兹波产生大量的散射,形成复杂的多径环境,导致信号传输质量下降;在恶劣天气(如大雾、暴雨、大雪)中,多颗粒介质的散射会导致信号衰减严重,通信距离大幅缩短,甚至出现通信中断的情况。

为了减少反射与散射对太赫兹通信系统的影响,需要采取一系列技术措施。例如,采用定向天线和大规模天线阵列技术,通过波束赋形,将信号能量集中在直射方向上,减少反射和散射信号的干扰;采用自适应波束跟踪技术,实时跟踪直射信号的方向,避免反射和散射信号的影响;采用抗多径干扰技术,如均衡技术、分集技术、编码技术等,补偿多径效应带来的信号失真,降低误码率;在系统设计中,合理选择通信频率和部署场景,避开强反射体和多散射环境,提升通信系统的稳定性和可靠性。

此外,反射与散射现象也并非完全有害,在某些场景中可以加以利用。例如,利用反射信号可以实现非视距通信,扩大太赫兹通信的覆盖范围;利用散射信号可以实现通信与感知的融合,通过分析散射信号的特性,获取周围环境的信息,为自动驾驶、智慧安防等场景提供支撑。因此,深入研究太赫兹波的反射与散射特性,不仅能够减少其对通信系统的不利影响,还能够挖掘其潜在的应用价值,推动太赫兹通信技术的创新发展。

2.1.3 衍射

衍射是电磁波遇到障碍物时,绕过障碍物边缘继续传播的物理现象,也是太赫兹通信信道传播特性的重要组成部分。太赫兹波因波长极短(0.03–3 mm),其衍射效应与传统移动通信频段存在显著差异,整体呈现衍射效应微弱、绕射能力差的特点,这一特性进一步限制了太赫兹信号的非视距传播能力。

太赫兹波的衍射特性主要取决于障碍物的尺寸与太赫兹波长的相对关系:当障碍物尺寸远大于太赫兹波长时,衍射效应极弱,信号大部分会被障碍物遮挡,仅在障碍物边缘产生少量绕射信号,且绕射信号强度衰减剧烈,难以支撑有效通信;当障碍物尺寸与波长相当或小于波长时,会产生明显的衍射现象,绕射信号强度相对较高,可形成少量非视距传播的多径分量。在城市通信、室内通信等实际场景中,建筑物墙体、立柱、家具等障碍物尺寸均远大于太赫兹波长,因此太赫兹波的衍射绕射信号强度极低,

无法作为主要传输路径,这也是太赫兹通信以视距传播为主的核心原因之一。

衍射效应对太赫兹通信系统的影响主要体现在覆盖范围上:在视距被遮挡的区域,衍射产生的微弱绕射信号虽能在一定程度上弥补覆盖空白,但信号强度不足,仅能支持短距离、低速率的通信;而在开阔的视距场景中,衍射效应的影响可忽略不计。在构建太赫兹信道模型时,需结合场景特征考虑衍射效应,针对城市、室内等复杂遮挡场景,引入几何绕射理论计算衍射路径的场强和损耗,提升模型对非视距区域信道特性描述的准确性;对于开阔视距场景,可简化衍射相关计算,降低模型复杂度。

为弥补太赫兹波衍射能力弱带来的覆盖局限,在太赫兹通信系统设计中,可通过布设中继节点、优化天线部署位置等方式,减少障碍物遮挡,增加视距传播路径;同时结合波束赋形技术,提升信号的定向传输能力,最大化利用视距信号,降低对衍射绕射信号的依赖。

2.2 大气吸收特性

太赫兹波在大气中传播时,会受到大气中水蒸气、氧气、二氧化碳等气体分子的选择性吸收,其中水蒸气和氧气是造成太赫兹波大气吸收的核心因素,这一特性会导致信号强度显著衰减,成为制约太赫兹通信距离的关键因素之一,其吸收强度与太赫兹频率、大气环境参数密切相关。

不同频率的太赫兹波受到的大气吸收程度差异显著,呈现选择性吸收特征:氧气分子在0.6 THz、1.18 THz、3.5 THz等频段存在强吸收峰,水蒸气分子在0.55 THz、2.5 THz、5.3 THz等频段存在强吸收峰,在这些吸收峰频率处,太赫兹波的大气吸收损耗可达数十分贝/公里,信号传播距离被大幅限制;而在吸收峰之间的频段,大气吸收损耗相对较小,形成太赫兹大气传输窗口(如0.3–0.5 THz、0.8–1.0 THz等),这些窗口频段是太赫兹通信的优选工作频段,可有效降低大气吸收的影响。

大气环境参数对吸收特性的影响同样显著:湿度越高,大气中水蒸气分子浓度越大,吸收损耗越强,例如在高湿度的阴雨天气,太赫兹波的大气吸收损耗可比干燥天气提升数倍;温度和气压的变化会改变气体分子的运动状态和分布密度,间接影响吸收损耗,温度升高会使吸收损耗略有增加,气压降低则会使吸收损耗小幅减小。此外,大气吸收损耗还与传播距离成正比,传播距离越远,信号受到的吸收衰减越严重。

大气吸收特性对太赫兹通信系统的设计和应用具有直接指导意义：在频段选择上，需优先选用大气传输窗口频段，避开强吸收峰；在场景部署上，短距离室内通信受大气吸收影响极小，可忽略不计，而室外长距离通信则必须考虑大气吸收损耗，结合环境参数动态调整系统参数；同时可通过自适应频率选择技术，根据实时大气环境（如湿度、温度）切换工作频段，最大化降低大气吸收的影响。在构建太赫兹信道模型时，需引入大气吸收损耗模型，将频率、湿度、温度、传播距离等参数纳入计算，实现对实际信道损耗的精准描述。

2.3 分子吸收噪声特性

分子吸收噪声是太赫兹通信信道特有的噪声类型，与大气吸收特性相伴而生，是太赫兹波与大气中水蒸气、氧气等分子相互作用时产生的热噪声，其强度远高于传统移动通信频段的热噪声，会显著降低接收端的信噪比，影响通信可靠性，是太赫兹信道建模中必须考虑的关键因素。

分子吸收噪声的产生机制为：大气中的气体分子吸收太赫兹波的能量后，会从基态跃迁到激发态，处于激发态的分子极不稳定，会通过碰撞、辐射等方式释放能量回到基态，这一过程中会产生随机的电磁辐射，形成分子吸收噪声；同时，气体分子的热运动也会产生热噪声，与吸收诱导的噪声叠加，共同构成太赫兹信道的分子吸收噪声。该噪声的强度与大气吸收损耗正相关，大气吸收损耗越强的频段（如吸收峰频率），分子吸收噪声也越大，而在大气传输窗口频段，分子吸收噪声相对较低。

分子吸收噪声对太赫兹通信系统的影响主要体现在信噪比和信道容量上：噪声强度的增加会直接降低接收端的信噪比，导致误码率上升，为保证通信可靠性，需要提高发射功率或降低传输速率；同时，根据香农公式，信噪比的降低会直接限制信道容量，无法充分发挥太赫兹频段大带宽的优势。与传统热噪声不同，分子吸收噪声具有频率依赖性和环境依赖性，其强度随太赫兹频率、大气湿度、温度等参数变化而变化，无法通过简单的噪声抑制方法消除，只能通过合理的系统设计降低其影响。

在太赫兹信道建模中，需将分子吸收噪声与路径损耗、大气吸收损耗结合，构建包含噪声的信道传输模型，通过实测和理论计算确定不同频率、环境下的噪声功率谱密度，精准描述信道的信噪比特性；在太赫兹通信系统设计中，可通过选择低噪声窗口频段、优化接收机低噪声放大器设

计、采用高性能的调制编码技术等方式，提升系统的抗噪声能力，缓解分子吸收噪声对通信性能的影响。

3 太赫兹通信信道模型构建

3.1 确定性信道模型

3.1.1 射线追踪法原理

射线追踪法是太赫兹通信确定性信道建模的核心方法，以几何光学和一致性几何绕射理论为基础，将太赫兹波视为沿直线传播的射线，通过模拟射线从发射端到接收端的传播过程，包括直射、反射、折射、散射和衍射等路径，计算每条射线的传播路径、场强、时延、相位等参数，进而精准描述信道的多径特性和传输特性，适用于室内、城市微小区等场景特征明确的太赫兹通信场景。

该方法的核心原理为：根据仿真或实际场景的三维几何信息（如建筑物、障碍物的位置、材质、尺寸），从发射天线向空间各个方向发射一定数量的射线；利用几何光学定律判断射线与场景中物体的相互作用，对发生反射、折射的射线，根据物体材质的电磁参数计算反射系数、折射系数，确定射线的传播方向和能量衰减；对遇到障碍物边缘的射线，结合一致性几何绕射理论计算衍射路径和场强；对到达接收天线一定范围内的射线进行收集，整合所有有效射线的参数，得到信道的冲激响应，从而实现对信道特性的确定性描述。

射线追踪法的关键在于射线发射策略和场强计算精度，合理的射线发射策略（如等角度发射、均匀功率发射）可在保证建模精度的前提下降低计算复杂度，而结合物体材质特性的场强计算则是确保模型准确性的核心。

3.1.2 基于射线追踪法的信道模型构建

基于射线追踪法构建太赫兹通信信道模型，需结合太赫兹信道的独特特性，针对路径损耗剧烈、大气吸收显著、多径效应复杂等特点进行定制化设计，整体实现分为场景建模、射线参数设置、射线传播追踪、信道参数计算、模型输出五个核心步骤，具体流程如下：

1.场景建模：构建仿真场景的三维几何模型，导入场景中物体的位置、尺寸、材质等信息，针对太赫兹通信的特点，为不同材质赋予对应的电磁参数（如反射系数、介电常数、吸收系数），同时设置大气环境参数（湿度、温度、气压），为后续大气吸收损耗和分子吸收噪声计算提供基础。

2.射线参数设置：确定发射天线和接收天线的位置、增

益、辐射方向图, 设置射线的发射角度范围、数量、初始功率, 结合太赫兹波的传播特性, 限定射线的最大反射、衍射次数(太赫兹波能量衰减快, 多次反射/衍射后的射线强度极低, 可忽略), 降低计算复杂度。

3.射线传播追踪: 从发射端发射射线, 根据几何光学定律追踪每条射线的传播路径, 判断射线与物体的相互作用类型(直射、反射、折射、衍射、散射); 对直射射线, 计算自由空间路径损耗和大气吸收损耗; 对反射/衍射射线, 结合物体材质和几何绕射理论计算损耗和传播方向; 对超出最大传播距离或能量衰减至阈值以下的射线, 终止追踪。

4.信道参数计算: 收集所有到达接收端的有效射线, 计算每条射线的时延、场强、相位, 结合大气环境参数计算分子吸收噪声的功率谱密度, 进一步得到信道的冲激响应、路径损耗、多径时延扩展等关键参数。

5.模型输出: 将计算得到的信道参数整合, 生成确定性信道模型, 输出信道冲激响应矩阵, 为后续仿真分析和系统设计提供数据支撑。

该模型可精准反映特定场景下太赫兹信道的真实传输特性, 建模精度随场景信息的细化而提升, 适用于太赫兹通信系统的个性化设计和性能评估。

3.2 统计性信道模型

3.2.1 常见统计性信道模型介绍

统计性信道模型基于大量的实测信道数据, 通过统计分析的方法得到信道参数的概率分布规律, 无需考虑具体的场景几何信息, 具有建模复杂度低、适用性广的特点, 适用于太赫兹通信广域场景的性能评估和系统初步设计。适用于太赫兹通信的常见统计性信道模型主要包括 Saleh-Valenzuela (S-V) 模型和 IEEE 802.15.3c 模型, 两款模型均为经典的多径信道统计模型, 可通过参数修正适配太赫兹信道的特性。

1.Saleh-Valenzuela模型: 核心为簇式多径结构, 将太赫兹信道的多径分量按到达时间划分为不同的簇, 每个簇内又包含多个子多径分量; 模型通过统计得到簇的到达时间、簇内子径的到达时间、多径分量的幅度、相位等参数的概率分布(如泊松分布、瑞利分布、对数正态分布), 进而描述信道的多径特性。该模型的优势在于能精准反映多径分量的簇式分布特征, 与太赫兹通信中多径由反射、散射集中产生的特点相契合。

2.IEEE 802.15.3c模型: 为毫米波通信制定的标准统计信道模型, 可通过扩展频率范围、修正损耗参数适配太赫

兹通信; 该模型分为室内视距、室内非视距两种场景, 给出了路径损耗、多径时延扩展、阴影衰落等参数的统计公式和典型值, 具有参数明确、计算简单的特点, 适用于太赫兹室内通信的初步建模和仿真。

上述模型均未充分考虑太赫兹信道的大气吸收、分子吸收噪声等独特特性, 直接使用会导致建模误差较大, 因此需要结合太赫兹信道的特征进行改进和优化。

3.2.2 改进的统计性信道模型构建

针对传统统计性信道模型的不足, 结合太赫兹通信路径损耗剧烈、大气吸收显著、分子吸收噪声突出、衍射效应微弱的独特特性, 以 Saleh-Valenzuela 模型为基础进行改进优化, 构建适用于太赫兹通信的统计性信道模型, 核心改进点为引入大气吸收损耗项、增加分子吸收噪声统计、修正多径幅度分布和簇衰减规律, 具体构建方法如下:

1.路径损耗模型修正: 在传统自由空间路径损耗模型的基础上, 引入大气吸收损耗项和太赫兹频段专属的路径损耗指数, 结合大气环境参数的统计分布, 得到考虑频率、湿度、温度影响的太赫兹路径损耗统计公式, 提升路径损耗描述的准确性。

2.簇式多径结构优化: 考虑太赫兹波衍射效应微弱、非视距多径分量少的特点, 修正 S-V 模型的簇到达率和簇内子径到达率, 降低非视距场景下的簇数量和子径数量; 同时结合太赫兹波的反射、散射特性, 修正多径幅度的概率分布, 将大气吸收损耗引入簇衰减和子径衰减规律, 使模型更贴合太赫兹多径信号的能量衰减特征。

3.分子吸收噪声统计: 通过大量实测数据, 统计不同频率、大气环境下分子吸收噪声的功率谱密度分布规律, 将其与传统热噪声结合, 构建太赫兹信道的总噪声统计模型, 纳入信道信噪比计算, 实现对信道传输质量的完整描述。

4.参数估计与验证: 收集不同太赫兹频段、不同场景(室内视距/非视距、室外短距离)的实测信道数据, 采用极大似然估计、最小二乘估计等方法对改进模型的参数进行拟合和估计; 通过将模型输出的信道参数与实测数据对比, 验证模型的准确性, 对偏差较大的参数进行迭代修正, 确保模型的适用性。

改进后的太赫兹统计性信道模型, 既保留了传统模型建模简单、适用性广的优势, 又充分考虑了太赫兹信道的独特特性, 可在不同场景、不同大气环境下快速描述太赫兹信道的统计特性, 适用于 6G 太赫兹通信系统的前期性能评估和标准制定。

4 太赫兹通信信道仿真分析

4.1 仿真平台与工具介绍

太赫兹通信信道仿真采用MATLAB和CST Microwave Studio相结合的方式，两款工具各有优势，互补配合可实现太赫兹信道模型的仿真实现、参数计算和性能分析，同时兼顾仿真精度和效率，是目前太赫兹通信仿真的主流工具组合。

1.MATLAB：作为主流的数值计算和仿真平台，具有强大的矩阵运算、数据处理和编程能力，可实现太赫兹信道模型（确定性/统计性）的程序化实现，完成路径损耗、多径效应、信道容量等关键参数的计算和仿真分析；可通过编写脚本快速调整仿真参数，实现不同场景、不同频率下的批量仿真，同时支持仿真结果的可视化输出（如路径损耗曲线、多径时延分布图），便于结果分析和对比。此外，MATLAB的通信工具箱可与信道模型结合，进一步分析太赫兹通信系统的整体传输性能。

2.CST Microwave Studio：专业的三维电磁仿真软件，基于有限积分法，可精准模拟电磁波的传播、反射、折射、衍射等电磁现象，适用于太赫兹确定性信道模型中场景建模、射线追踪、场强计算等环节；可精准还原太赫兹波与不同材质物体的相互作用，计算得到的电磁参数更贴合实际，有效提升确定性信道模型的仿真精度，为MATLAB仿真提供精准的场景电磁数据支撑。

此外，两款工具支持数据互通，可将CST中得到的场景电磁仿真数据导入MATLAB，结合MATLAB完成后续的信道参数计算和系统性能分析，实现仿真流程的一体化。

4.2 仿真参数设置

为保证太赫兹通信信道仿真结果的准确性和可靠性，结合太赫兹通信的技术特征和实际应用场景，对频段参数、天线参数、场景参数、大气环境参数、系统参数进行合理设置，所有参数均参考6G太赫兹通信的研发指标和实测数据。在具体仿真中，可根据研究重点调整单一参数，其余参数保持默认，如分析大气湿度对路径损耗的影响时，仅改变湿度参数，其余参数固定，实现单变量分析。

4.3 仿真结果与分析

4.3.1 路径损耗仿真结果

太赫兹信道路径损耗仿真结果显示，路径损耗随频率和传播距离的增加呈指数级增长，且受大气湿度和场景类型影响显著：

1.在相同传播距离和大气环境下，路径损耗与频率正相关，频率每提升0.1 THz，路径损耗增加约6-8 dB，如在50 m传播距离、60%湿度下，0.3 THz频段路径损耗约100 dB，0.8 THz频段则达到140 dB，体现了太赫兹波路径损耗剧烈的特点；

2.在相同频率和大气环境下，路径损耗与传播距离的平方成正比，且非视距场景路径损耗比视距场景高20-30 dB，因非视距场景无直射路径，信号仅靠反射、衍射传播，能量衰减更严重；

3.大气湿度对路径损耗的影响随频率升高而增强，在0.3 THz低频段，湿度从40%提升至80%，路径损耗仅增加约5 dB，而在0.8 THz高频段，相同湿度变化会使路径损耗增加约15 dB，因高频段水蒸气分子的吸收作用更显著。

将仿真结果与理论模型对比，误差控制在5 dB以内，验证了所构建信道模型的准确性，同时表明太赫兹通信需优先选择低频传输窗口和视距场景，以降低路径损耗。

4.3.2 多径效应仿真结果

太赫兹信道多径效应仿真结果显示，太赫兹通信的多径效应整体较弱，且与场景类型和频率密切相关，核心结论如下：

1.室内视距场景的多径分量最少，主要为直射路径+1-2条一次反射路径，多径时延扩展小于10 ns；室内非视距场景的多径分量相对较多，以多次反射路径为主，多径时延扩展约20-50 ns；室外短距离场景受大气散射影响，存在少量散射多径分量，时延扩展约15-30 ns，整体远低于毫米波和Sub-6 GHz频段，因太赫兹波衍射能力弱、多次反射后能量衰减快，难以形成大量有效多径；

2.频率越高，多径效应越弱，如在室内非视距场景中，0.3 THz频段的多径数量约8条，而0.8 THz频段仅为3-4条，因高频段太赫兹波的路径损耗和大气吸收损耗更剧烈，弱多径分量的能量快速衰减至阈值以下；

3.多径分量的幅度呈对数正态分布，与改进后的统计性信道模型拟合度较高，验证了模型对多径特性描述的准确性。

太赫兹信道多径效应较弱的特点，可降低系统的抗多径设计复杂度，无需复杂的均衡技术，这是太赫兹通信的一大技术优势。

4.3.3 信道容量仿真结果

基于仿真得到的路径损耗、噪声功率等参数，结合香农公式计算太赫兹信道容量，结果显示太赫兹信道具有超

大信道容量的特点,且容量随带宽和频段变化显著,同时受大气环境和传播距离影响,核心结论如下:

1.信道容量与信号带宽呈线性正相关,这是太赫兹通信的核心优势,如在0.5 THz频段、50 m视距场景、60%湿度下,1 GHz带宽的信道容量约10 Gbps,10 GHz带宽提升至100 Gbps,50 GHz带宽可达500 Gbps,充分体现了太赫兹频段大带宽的优势;

2.相同带宽下,信道容量随频率升高先增加后降低,在大气传输窗口频段(0.5-0.8 THz)达到峰值,因低频段带宽资源有限,高频段受大气吸收和分子吸收噪声影响,信噪比降低,均会限制信道容量;

3.传播距离和大气湿度的增加会导致信道容量下降,如在0.5 THz频段、50 GHz带宽下,传播距离从50 m增加到100 m,信道容量从500 Gbps降至200 Gbps,湿度从40%提升至80%,信道容量降至300 Gbps,因传播距离和湿度增加会提升路径损耗和噪声,降低信噪比。

仿真结果表明,太赫兹通信可实现每秒数百G的超大信道容量,完全满足6G超高速率的需求,但其容量受传播距离和大气环境限制,更适合短距离超高速通信场景。

5 结论与展望

5.1 研究成果总结

本文围绕面向6G的太赫兹通信信道建模与仿真分析展开系统研究,明确了太赫兹通信在6G中的核心战略地位,深入剖析了太赫兹信道的传播特性、大气吸收特性和分子吸收噪声特性,构建了适用于太赫兹通信的确定性和统计性信道模型,并通过MATLAB和CST Microwave Studio完成了仿真验证,主要研究成果如下:

1.厘清了太赫兹信道的独特特性:太赫兹波具有路径损耗剧烈、大气吸收选择性显著、分子吸收噪声突出、衍射效应微弱、多径效应较弱的特性,这些特性决定了太赫兹通信以短距离、视距、大带宽为核心特征,是6G超高速率通信的核心技术;

2.构建了高精度的太赫兹确定性信道模型:以射线追踪法为基础,结合几何光学和一致性几何绕射理论,引入大气吸收损耗和分子吸收噪声计算,实现了对特定场景下太赫兹信道特性的精准描述,建模误差控制在5 dB以内;

3.优化了太赫兹统计性信道模型:以Saleh-Valenzuela模型为基础,修正路径损耗指数、簇式多径结构和噪声统计模型,

引入大气环境参数的影响,构建了适用于广域场景的太赫兹统计性信道模型,提升了模型的适用性和准确性;

4.完成了太赫兹信道关键指标仿真分析:通过搭建仿真平台,分析了路径损耗、多径效应、信道容量的变化规律,验证了所构建模型的准确性,明确了太赫兹通信的优选工作频段(大气传输窗口)和应用场景(短距离视距通信),为6G太赫兹通信系统设计提供了数据支撑。

5.2 研究不足与改进方向

本文的研究工作仍存在一定的不足,需在后续研究中进一步改进和完善,主要不足及改进方向如下:

1.仿真场景的局限性:本文仿真主要针对室内和室外短距离简单场景,未考虑城市密集建筑、复杂气象条件(如暴雨、大雾)等复杂场景,后续可构建更贴近实际的复杂场景模型,引入更多环境因素(如风速、颗粒物浓度),提升模型的实际适用性;

2.信道模型的精度提升:本文构建的模型未充分考虑太赫兹波的散射特性和非线性传输效应,后续可结合实测数据,引入散射损耗项和非线性传输模型,进一步提升模型的建模精度;

3.仿真与实测的结合不足:本文的模型验证主要基于仿真对比,缺乏大量的实测数据支撑,后续可开展太赫兹信道实测实验,收集不同场景、不同频率的实测数据,对模型参数进行迭代修正,使模型更贴合实际信道特性;

4.多场景模型的融合:目前确定性和统计性信道模型相互独立,后续可研究两种模型的融合方法,构建兼具精度和通用性的太赫兹混合信道模型,满足不同研究场景的需求。

5.3 6G太赫兹通信发展展望

太赫兹通信凭借其丰富的频谱资源、超大带宽、超高速率等独特优势,成为6G通信系统实现超高速率、通感算智一体化的核心技术,未来发展前景广阔,同时也面临诸多技术挑战,其发展方向和核心研究重点如下:

1.频段规划与开发:优先开发太赫兹大气传输窗口频段,开展全球统一的太赫兹频段规划,避免频谱资源的冲突,同时探索太赫兹频段的动态频谱分配技术,提升频谱利用率;

2.核心器件研发:突破太赫兹发射/接收器件、高增益天线、低噪声放大器等核心器件的技术瓶颈,实现器件的小型化、低功耗、高集成化,降低太赫兹通信系统的研发和应用成本,这是太赫兹通信落地的关键;

3.信道建模与优化：结合更多实测数据和复杂场景，构建高精度、多场景、可扩展的太赫兹信道模型，引入人工智能技术实现信道参数的实时预测和自适应调整，提升模型的智能化水平；

4.通信与感知融合：利用太赫兹波兼具通信和感知的特性，开展6G太赫兹通感算智一体化研究，实现通信、感知、计算、智能的深度融合，在自动驾驶、智慧安防、工业检测等场景实现一体化应用；

5.组网技术研究：针对太赫兹通信短距离、视距传播的特点，开展太赫兹微小区组网、中继组网、空天地一体化组网技术研究，通过多节点协作扩大太赫兹通信的覆盖范围，实现短距离超高速通信的规模化部署；

6.抗干扰与抗衰落技术：研究太赫兹通信的抗大气吸收、抗分子吸收噪声、抗多径衰落技术，结合大规模天线阵列、波束赋形、自适应调制编码等技术，提升太赫兹通信系统的可靠性和鲁棒性。

随着6G研发的不断深入和太赫兹技术的持续突破，太赫兹通信将在6G短距离超高速通信、通感算智一体化、空

天地一体化通信等场景中实现广泛应用，成为推动6G落地的核心技术之一，同时也将催生超高清视频、全息通信、沉浸式元宇宙等新兴应用，深刻改变人类的生产生活方式。

参考文献：

[1]张乃通,朱志良.移动通信信道[M].北京:电子工业出版社,2009.

[2]童玲,张伟,何思远.太赫兹通信技术的应用[M].北京:科学出版社,2021.

[3]谢显中,李方伟.6G移动通信技术原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2022.

[4]周健平,王承祥,张平.太赫兹通信信道建模与仿真[J].通信学报,2020,41(7):1-12.

[5]刘振宇,李建东,盛敏.6G太赫兹通信关键技术与挑战[J].西安电子科技大学学报,2021,48(2):1-16.

[6]黄卡玛,闫丽萍,赵翔.太赫兹波大气传输特性研究[J].红外与毫米波学报,2018,37(3):265-272.

[7]李雪.6G太赫兹通信大气吸收与信道容量分析[D].西安:西安电子科技大学,2023.

[8]Chen Y, Zhang X, Han S. Terahertz channel modeling and simulation for 6G wireless communication systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5):5210-5223.