

面向6G回传网络的太比特级光缆传输技术前瞻

张忠毅

广西通信规划设计咨询有限公司 广西 南宁 530003

摘要: 6G回传网络需实现太比特级传输速率,以满足超高速率、超大连接、超低时延等需求。太赫兹通信、智能超表面辅助传输、光子集成电路优化等技术路径,为突破现有光纤容量极限提供可能。同时,空天地一体化架构与AI驱动的智能运维,可提升网络灵活性与资源利用率。未来,6G回传将融合超宽带、空分复用等技术,构建全场景覆盖、高效可靠的智能光传输网络。

关键词: 6G回传网络; 太比特级; 光缆传输技术

引言: 在数字化浪潮的推动下,通信技术持续迭代升级,6G时代正加速来临。6G回传网络作为信息传输的关键枢纽,需应对海量数据、超低时延等严苛需求,实现太比特级传输速率。但现有光纤传输逼近容量极限,且在频谱利用、网络架构、能效成本等方面面临诸多挑战。探索面向6G回传的太比特级光缆传输技术,成为开启6G通信新未来的关键所在。

1 6G回传网络的核心需求与挑战

1.1 6G典型应用场景的回传需求

1.1.1 工业元宇宙

作为6G技术深度融合工业场景的核心载体,工业元宇宙中多机械臂协同作业对回传网络时延提出严苛要求,需实现微秒级低时延传输,确保机械臂动作精准同步,避免作业偏差。同时,单工厂内海量传感器、设备产生的实时数据规模庞大,日均数据量可达PB级,对回传网络的容量承载能力构成极高考验^[1]。

1.1.2 智慧城市

智慧城市市场下,路灯、垃圾桶、环境监测设备等海量终端需实时回传环境参数、设备状态等数据,实现城市精细化管理。该场景具有终端分布密集、连接数量庞大的特点,每平方公里需支持百万级连接数,要求回传网络具备超高连接密度承载能力,同时保障数据传输的实时性与可靠性。

1.1.3 应急通信

在地震、洪水等极端灾害场景中,地面通信基础设施易遭受损毁,6G回传网络需依托卫星-无人机中继架构构建应急通信链路。灾害救援过程中,现场图像、视频等多媒体数据以及救援指令数据需实时回传,数据量可达TB级,要求回传网络在复杂链路条件下仍能实现高容量、低时延传输,为救援决策提供及时支撑。

1.2 现有回传技术的局限性

1.2.1 光纤传输

光纤传输技术虽具备高容量、低损耗的优势,但当前单模光纤的传输容量已接近100Tbps的理论极限,难以满足6G回传的太比特级容量需求。此外,光纤网络的扩容需要大规模铺设新线路、升级设备,不仅施工周期长,而且扩容成本高昂,无法适配6G场景的灵活部署需求。

1.2.2 微波/毫米波

微波与毫米波技术常用于中短距离回传,但受大气衰减、降雨衰减等环境因素影响显著,信号传输稳定性较差。同时,其传输距离有限,难以满足6G回传中远距离覆盖需求,且容量提升空间有限,无法匹配6G场景的高容量传输要求,应用场景存在明显局限。

1.3 关键挑战

1.3.1 频谱资源稀缺

6G回传网络需依托太赫兹频段(0.1-10THz)实现高容量传输,但该频段存在大气吸收严重、路径损耗大等问题,导致信号传输距离受限,覆盖能力不足。如何通过技术创新突破太赫兹频段的传输损耗瓶颈,提升信号传输距离与稳定性,同时高效规划频谱资源、避免频谱干扰,成为亟待解决的核心问题。

1.3.2 网络架构复杂

6G回传网络需构建空天地海多层次融合架构,整合卫星、无人机、地面基站、海洋通信节点等多种网络单元。不同层级网络的通信协议、传输特性差异较大,如何实现各层级网络的无缝切换,以及资源的动态协同调度,保障业务连续性,降低切换时延与数据丢包率,是网络架构设计的重大挑战^[2]。

1.3.3 能效与成本

6G回传网络需实现太比特级传输速率,而高容量传输往往伴随着高功耗,如何在保障传输性能的前提下降低设备功耗,提升网络能效,是实现绿色通信的关键。

同时,太赫兹设备、多层级网络部署等相关硬件与运维成本高昂,如何平衡传输性能、能效与部署经济性,推动6G回传网络规模化商用,成为制约其发展的重要挑战。

2 面向6G回传网络的太比特级光缆传输技术路径

2.1 太赫兹通信技术

2.1.1 技术原理

太赫兹通信技术的核心是利用太赫兹波段(0.1-10THz)的高频电磁特性,其频段宽度远超现有微波、毫米波频段,能够承载超宽带信号,从而实现太比特级的高速数据传输。该技术通过太赫兹发射器将电信号转换为太赫兹波信号,经传输链路送达接收端后再转换回电信号,依托高频段的频谱优势突破传统传输技术的容量限制。

2.1.2 应用场景

该技术在6G回传网络中,核心应用于地面基站与低轨卫星(LEO)之间的高速数据中继场景。低轨卫星星座具有覆盖范围广、传输时延低的特点,与地面基站形成协同组网时,需要海量数据的高速交互,太赫兹通信技术可满足两者间太比特级的回传需求,构建空天地一体化回传链路,支撑全球无缝通信^[3]。

2.1.3 挑战

太赫兹波在大气中传输时,易受氧气、水汽等成分的吸收影响,导致信号衰减严重,传输距离受限,通常仅能实现数百米至数公里的短距离传输,难以直接满足长距离回传需求。为突破这一瓶颈,需结合智能超表面(RIS)等技术,通过RIS对太赫兹信号的传播方向进行动态调控与增强,补偿信号衰减,提升覆盖范围与传输稳定性。

2.2 智能超表面(RIS)辅助传输

2.2.1 技术原理

智能超表面由大量可重构的可编程电磁单元组成,能够通过软件控制动态调整单元的电磁参数,进而改变入射电磁波的传播方向、相位、振幅等特性。其核心价值在于无需主动发射信号,仅通过被动调控即可优化无线信道环境,实现信号的聚焦传输,减少传输损耗,提升通信链路的质量与容量。

2.2.2 应用场景

在6G回传网络中,该技术重点应用于城市高楼密集区的信号增强场景。城市密集城区高楼林立,易对太赫兹、毫米波等高频信号形成遮挡,导致信号覆盖盲区。通过部署RIS,可灵活调控回传信号的传播路径,绕开遮挡物,增强信号覆盖强度,同时减少基站的部署数量,降低网络建设成本,适配城市复杂环境下的回传需求。

2.2.3 案例

中国工程院相关研究团队在6G外场试验中,开展了RIS

辅助传输的实证验证。试验结果表明,在城市密集城区场景下,部署RIS后,6G回传信号的覆盖率提升了30%以上,同时信号传输速率与稳定性也得到显著优化,为RIS技术在6G回传网络中的规模化应用提供了重要的实践支撑。

2.3 光子集成电路(PIC)优化

2.3.1 技术原理

光子集成电路(PIC)通过微纳制造技术,将激光器、调制器、探测器、波分复用器等多种光电子器件集成于单一芯片上。相较于传统分立光电子器件,PIC大幅缩短了光信号的传输路径,降低了光损耗与信号干扰,同时提升了器件的集成度、可靠性与响应速度,为太比特级传输提供了核心硬件支撑。

2.3.2 应用场景

在6G回传网络中,PIC优化技术主要应用于数据中心互联(DCI)与核心网高速转发场景。数据中心作为6G网络的数据存储与处理核心,其互联链路需承载海量数据的高速交互;核心网则承担着全网数据的转发与调度任务,两者均对传输容量与速率提出了太比特级要求,PIC技术可有效满足这些场景的高性能传输需求^[4]。

2.3.3 进展

国内光通信龙头企业光迅科技已推出支持太比特级传输的光子集成电路(PIC)解决方案。该方案通过高集成度的PIC芯片设计,实现了单芯片多通道并行传输,传输速率可达1.6Tbps,且具有低功耗、小型化的优势,已在部分商用场景开展试点应用,推动了6G回传网络核心硬件技术的成熟与落地。

2.4 自由空间光通信(FSO)与THz融合

2.4.1 技术原理

自由空间光通信(FSO)利用激光作为信息载体,通过大气或真空等自由空间实现高速传输;太赫兹(THz)通信则依托高频电磁波实现超宽带传输。两者融合技术通过构建协同传输链路,发挥FSO与THz的互补优势:FSO可弥补THz大气衰减严重的缺陷,THz则能突破FSO在恶劣天气下稳定性差的不足,实现优势互补、劣势抵消。

2.4.2 应用场景

该融合技术在6G回传网络中,适用于偏远地区覆盖与临时应急通信场景。偏远地区地形复杂,铺设光纤成本极高,FSO与THz融合技术可通过无线传输方式快速构建回传链路;在地震、洪水等应急场景中,地面通信基础设施易损毁,融合技术可依托移动平台(如无人机)快速部署临时回传链路,保障救援数据的实时传输^[5]。

2.4.3 优势

一方面,FSO技术利用激光传输,无需占用频谱资

源,可避免频谱许可的限制,大幅降低网络部署的政策门槛与成本;另一方面,THz技术具备超宽带特性,能够突破光纤传输的容量瓶颈,实现太比特级高速传输。两者融合后,既保障了传输容量与速率,又提升了部署灵活性与环境适应性,为6G回传网络的广域覆盖与应急保障提供了高效解决方案。

3 6G回传网络架构设计:融合协同与智能安全导向

3.1 空天地一体化架构

3.1.1 层级设计

6G回传空天地一体化架构核心涵盖地面、高空、天基三个协同层级。地面层以5G/6G基站为核心,依托升级后的光纤与太赫兹回传链路,承担高密度用户区域的近距离数据回传任务,保障基础覆盖的容量与速率;高空层部署无人机、飞艇等高空平台,作为中继节点构建空中传输链路,弥补地面基站在偏远地区、复杂地形的覆盖盲区,实现中距离数据转发;天基层以低轨卫星(LEO)星座为核心,凭借广域覆盖优势,承担跨区域、远距离的海量数据回传任务,形成全球无缝覆盖网络,三者协同构成“地面—高空—天基”全维度覆盖体系。

3.1.2 协同机制

架构采用基于SDN(软件定义网络)的动态资源调度机制。SDN技术通过分离网络控制平面与数据平面,实现对全层级网络资源的集中管控。通过构建统一的SDN控制器,实时感知地面、高空、天基各层级的网络负载、链路质量与业务需求,动态分配频谱、带宽等资源,优化数据传输路径。当某一层级链路出现拥堵或故障时,控制器可快速切换传输链路至其他层级,保障回传业务的连续性,提升网络资源利用率与抗干扰能力。

3.2 AI驱动的智能运维

3.2.1 技术路径

依托AI技术构建全流程智能运维体系,核心通过机器学习算法实现运维的精准化与自动化。基于海量历史回传流量数据,训练流量预测模型,精准预测不同时段、不同区域的流量峰值,提前预留带宽资源;针对光路传输中的损耗、干扰等问题,通过AI算法实时监测光路状态,自动调整光路配置参数,优化传输链路质量;同时,利用AI图像识别、故障诊断算法,实现设备故障的实时监测与预警,缩短故障修复时间,降低运维成本。

3.2.2 案例

华为ADN(自动驾驶网络)方案为6G回传智能运维提供了成熟实践参考。该方案通过内置AI引擎,实现回传网络的单域自治与闭环管理。方案可自动完成网络拓扑发现、业务部署与流量调度,针对工业元宇宙、智慧

城市等不同场景的回传需求,动态适配运维策略。在试点应用中,该方案将网络故障修复时间缩短80%以上,流量调度效率提升50%,实现了回传网络运维从“人工干预”向“自主决策”的转变,验证了AI驱动运维的可行性与高效性。

3.3 安全与可靠性保障

3.3.1 量子加密

采用量子密钥分发(QKD)技术构建核心数据安全防护体系。量子加密利用量子力学的不确定性原理与不可克隆定理,通过光子传输生成绝对安全的量子密钥。在6G回传网络中,针对政务、金融等核心领域的敏感数据传输,采用QKD技术对数据进行加密处理,即使密钥被窃取,也会因量子状态的扰动被实时感知,确保密钥的安全性。该技术从根本上解决了传统加密技术的密钥泄漏风险,为核心数据回传提供“无条件安全”保障。

3.3.2 区块链

引入区块链技术提升回传数据的可信度与完整性。通过构建分布式区块链节点网络,将回传数据的传输记录、处理日志等信息实时上链存储。区块链的去中心化特性避免了单一节点篡改数据的可能,数据一旦上链便无法篡改,可全程追溯数据流过程。在政务数据共享、金融交易数据回传等场景中,区块链技术能够有效提升数据信任度,保障数据在跨部门、跨区域传输中的安全性与合规性,进一步强化回传网络的可靠性。

结束语:6G回传网络对太比特级光缆传输技术的探索,是通信领域迈向新高度的关键一步。尽管当前面临频谱、架构、成本等诸多挑战,但太赫兹通信、智能超表面辅助等创新技术路径,已展现出巨大潜力。随着研究深入与技术融合,这些技术有望突破瓶颈,构建起高效、可靠、智能的6G回传网络,为未来全场景智慧生活与产业变革筑牢坚实根基。

参考文献

- [1]皮洪光.6G通信系统中太赫兹频段信道建模与传输性能优化研究[J].物理电子学,2025,(08):94-97.
- [2]谢雨良,田雨晴.6G智能内生无线通信网络:现状、挑战、系统设计和架构[J].移动通信,2024,48(08):8-12.
- [3]金超.6G通信系统中太赫兹频段信道建模与传输技术[J].建筑科学,2025,(07):72-74.
- [4]张建华,王珩,张宇翔.6G信道新特性与建模研究:挑战、进展与展望[J].中国科学:信息科学,2024,54(05):1114-1143.
- [5]宋莉.面向6G的无人机辅助毫米波异构网络安全设计[J].信息记录材料,2025,26(04):144-146.