

光纤通信在现代通信网络中的应用研究

王 冬

国网长治供电公司, 山西 长治 046011

[摘要] 光纤通信是以光波为载体, 以光纤为传输媒介的一种通信方式, 是现代通信网络的物理基础。伴随着互联网流量呈爆发式增长、5G 大规模商用、云计算和人工智能技术飞速发展, 光纤通信在骨干网、城域网、接入网、移动通信前传/回传以及数据中心内部互联等场景中起着不可替代的作用。文中在系统梳理光纤通信技术优势的基础上, 对光纤通信在各种网络场景中应用现状及存在的主要问题进行了详细的分析, 然后从骨干和城域网、接入网、移动通信和数据中心、新技术和智能化应用等几个方面, 对光纤通信在现代通信网络中的具体应用进行了全面的论述。从研究结果可知, 光纤通信正向着超大容量、超长距离、智能化管理方向发展, 是支撑数字经济时代信息基础设施建设的重要技术。

[关键词] 光纤通信; 骨干网; 接入网; 数据中心; 5G

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20363

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

Research on the Application of Fiber Optic Communication in Modern Communication Networks

WANG Dong

State Grid Changzhi Power Supply Company, Changzhi, Shanxi, 046011, China

Abstract: Fiber optic communication is a communication method that uses light waves as carriers and optical fibers as transmission media, and is the physical foundation of modern communication networks. With the explosive growth of Internet traffic, the rapid development of 5G large-scale commercial, cloud computing and artificial intelligence technologies, optical fiber communication plays an irreplaceable role in backbone networks, metropolitan area networks, access networks, mobile communication forward/backward transmission, and the interconnection of data centers. On the basis of systematically sorting out the advantages of fiber optic communication technology, this article provides a detailed analysis of the current application status and main problems of fiber optic communication in various network scenarios. Then, it comprehensively discusses the specific applications of fiber optic communication in modern communication networks from several aspects, such as backbone and metropolitan area networks, access networks, mobile communication and data centers, new technologies, and intelligent applications. From the research results, it can be seen that fiber optic communication is developing towards ultra large capacity, ultra long distance, and intelligent management, and is an important technology supporting the construction of information infrastructure in the digital economy era.

Keywords: fiber optic communication; backbone network; access network; data center; 5G

引言

光纤通信自从 20 世纪 70 年代诞生之后, 经历了由多模到单模、由短波长到长波长、由电时分复用到波分复用的不断演进, 已经成为现代通信网络中不可缺少的物理层传输基础。伴随高清视频、虚拟现实、物联网、5G 移动通信、云计算、人工智能等一系列技术的发展, 全球网络流量呈指数级增长, 给通信网络的传输容量、传输距离、灵活调度能力等提出前所未有的要求。光纤通信的发展史就是一部不断打破传输容量和距离极限的历史, 表现出它无与伦比的带宽潜力。目前光通信正在向全光互联、算网

融合、智能化等方向发展, 超高速率、超大容量、超长距离是光通信不断突破的方向。在此情况下, 对光纤通信在现代通信网络中应用的现状和发展趋势进行系统的研究, 对正确把握网络发展趋向、改善网络结构设计、推进信息基础设施建设有着十分重要的理论意义和现实指导作用。

1 光纤通信在现代通信网络中的技术优势

光纤通信之所以成为现代通信网络的主要传输方式, 是因为它相比传统的铜缆、无线传输有诸多技术上的优点。首先就是巨大的传输带宽。光纤可以利用的光谱资源非常丰富, 光纤通信具有频带宽、容量大、传输距离远等特点,

单模光纤的可用带宽理论上可以达到几十太赫兹以上,远远大于铜缆和微波频段所能提供的带宽。目前使用密集波分复用技术,单纤传输容量已经超过了百兆比特每秒,远远大于铜缆的传输能力。其次就是极低的传输损耗。光纤在 1.55 μm 窗口的损耗可以低到 0.2dB/km,因此无中继传输距离可达几百公里,比同轴电缆和双绞线要远得多。第三,具有很强的抗电磁干扰能力。光纤是由石英玻璃制成的,是电绝缘体,不被雷电、电气设备和外界电磁场所影响,也没有信号辐射泄露的安全隐患,具有天然的保密性。第四是体积小、重量轻,光纤直径为 125 μm (含涂覆层),同等传输容量下光缆比铜缆小得多、轻得多,节省了管道资源,降低了施工难度。第五是丰富的可用频谱资源,给未来的容量扩展留出了充足的余地。光纤耐腐蚀、寿命长、原材料来源广,综合经济效益好。

2 光纤通信在现代通信网络中的应用现状

2.1 骨干与城域网络应用现状

骨干网、城域网是光纤通信应用最广的两个领域。在中国骨干传输层面,目前已经形成了世界上规模最大、技术最先进、光纤骨干网总长超过 300 万公里的光纤骨干网,在全国所有的地级及以上城市都有覆盖。骨干网的核心传输技术已经全部采用了密集波分复用技术,C 波段、L 波段的光谱资源被充分利用,单纤传输容量一般都达到了几十 Tbps 量级,部分核心链路已经开始使用 400Gbps 以上的超高速相干传输系统。中国移动研究院提出九州算力光网的目标架构之后,就使超高速率、超大容量、超长距离的光传输技术不断向前发展。长距离光传输系统要考虑色散、非线性效应、多种放大器造成的光信噪比劣化等,所以骨干网普遍使用掺铒光纤放大器、拉曼放大器、前向/后向纠错技术,配合相干检测和数字信号处理技术,实现了几千公里的超长距离无电中继传输。城域网络层面光纤通信技术多样化,城域光传送网是骨干传送网的延伸,也是城域多业务综合承载平台,主要作用是把城域内各个系统之间的信号连接起来,给用户建设性的综合业务接入。

2.2 接入网络应用现状

光纤接入网是光纤通信向用户端延伸的重要部分,也是宽带战略实施的主要领域。近几年来,由于“光进铜退”战略的不断推进,我国光纤接入网建设取得了举世瞩目的成就。目前光纤接入已经从城市走向了乡村,光纤宽带网络已经覆盖了全国绝大多数的家庭和企事业单位。我国已经建成全球规模最大的、技术最先进、光纤宽带网络用户比例最高的光纤宽带网络,光纤到户用户占总用户数的 95%以上,宽带网络由“百兆普及”进入“千兆引领”。

从技术体制上讲,无源光网络为主要的形式,EPON、GPON 技术在中近期内得到了广泛的应用,10G PON 也已经开始大规模商用,下行 10Gbps、上行 2.5Gbps 的带宽能力可以满足 4K/8K 视频、在线教育、远程医疗等高带宽业务的接入需求^[1]。同时下一代 PON 技术 50G PON 的标准化、试验工作也正在开展,给未来万兆入户、全光接入打下了技术基础。

2.3 移动通信与数据中心应用现状

光纤通信在移动通信网络以及数据中心的应用近几年来增长很快。移动通信领域由于 5G 承载网的建设而使得光纤光缆的需求量越来越大。移动承载网分为前传、中传、回传三部分,分别是 AAU 和 DU 之间的、DU 和 CU 之间的、CU 和核心网之间的连接。由于 5G 网络架构的变化,承载网在带宽、时延、同步、灵活性等各方面提出了新的需求,5G 前传网络对光纤资源的消耗很大,需要大规模部署光纤直连或者无源波分系统。数据中心随着云计算、大数据的发展,数据中心内部光互联也由原来的 40G、100G 向现在的 400G、800G 发展,光模块成了决定数据中心性能和能耗的重要因素。数据中心内部光互连距离一般在几米到几百米之间,主要使用多模光纤加 VCSEL 激光器,单模光纤加硅光技术等不同的方式。数据中心之间互联主要使用密集波分复用技术以及相干光模块,可以支持几百公里的传输距离。

2.4 光纤通信应用中存在的主要问题

虽然光纤通信技术已经取得了巨大的成就,但是它在实际的应用过程中也存在着诸多的问题与挑战,这些问题是技术的、经济的、管理的等各个方面所造成的。光纤通信系统中存在传输损耗、色散、非线性效应三个主要的限制因素,这三个因素一起影响着传输容量和传输距离的进一步提高。特别是光纤非线性效应,在入纤功率较大时会引发自相位调制、交叉相位调制以及四波混频等非线性现象,极大地影响了信号的质量,成为了目前提高传输容量和距离的主要障碍。光纤到户建设成本高、施工难度大、入户光纤安装难等问题仍然比较严重,在农村、边远地区人口密度低、地理环境复杂的环境下,光纤接入的投资回报周期较长,宽带普遍服务的覆盖面受到影响,城乡数字鸿沟依然存在。从器件上来说,高端光芯片和光模块国产化率低,关键核心技术被国外垄断,25G 及以上速率的光电芯片、相干光模块中数字信号处理芯片等仍然严重依赖进口^[2],产业安全问题不能小视。大规模光纤网络运维管理越来越复杂,故障定位难、资源管理乱、运维成本高成了运营商所面对的实际问题。海量光纤资源利用率、调度灵活性还不能满足网络流量变化的要求,参见下表。

表 1 光纤通信应用中的主要问题及分析

问题类型	具体表现	主要原因	影响范围	应对方向
传输损耗	信号功率衰减、传输距离受限	光纤吸收、散射、宏弯/微弯损耗	骨干网、城域网	低损耗光纤、拉曼放大
色散效应	脉冲展宽、码间干扰	材料色散、波导色散、偏振模色散	高速骨干传输	色散补偿、相干检测+DSP
非线性效应	信号畸变、频谱展宽	自相位调制、交叉相位调制、四波混频	大容量 WDM 系统	入纤功率控制、新型调制格式
接入成本高	农村/偏远地区覆盖难	用户密度低、地理条件复杂	接入网	无线光融合、PON 技术下沉
核心技术受制	高端光芯片依赖进口	产业基础薄弱、研发积累不足	全产业链	自主创新、国产替代
运维管理难	故障定位慢、资源利用低	网络规模大、管理手段落后	全网运维	智能化运维、数字孪生

3 光纤通信在现代通信网络中的具体应用

3.1 骨干与城域网络应用

骨干网主要用在超高速率、超大容量的远距离传输系统上。根据 G.652 标准单模光纤的骨干网已经全部采用 100G、200G 相干光传输系统，并逐渐向 400G、800G 演进，WDM/OTN 是骨干网的主要技术方案。伴随着 400G 以上速率系统商用部署，偏振复用高阶调制格式、概率星座图整形、高速 DSP 芯片等成为关键技术。城域网中光纤通信的应用重点由原来的单纯传输容量向灵活调度、业务感知发展。城域光传送网一般采用环形或者网状拓扑，使用密集波分复用技术把多个光信号复用到一根光纤上进行传输，可以大大提高光纤的利用率。ROADM 在城域网中部署之后，光层调度变得更加灵活，在不需要进行光电光转换的情况下就可以完成任意波长在任意节点的上下路。城域网络的另外一个重要应用就是 OTN 下沉，OTN 技术以标准化的封装映射体系、完善的维护管理能力、多业务承载能力为特点，正在从骨干网向城域边缘延伸，成为城域综合业务承载的统一平台。

3.2 接入网络应用

光纤在接入网中应用是光纤通信走向用户的必然，目前主要有各种技术方案并存的情况。FTTH 是宽带接入的最终目标方案，使用 PON 技术进行点对多点的接入，带宽大、稳定性好、维护成本低。城市区域 FTTH 已经大面积铺设完毕，新建住宅区基本上都实现了光纤入户。FTTB 采用光纤到楼栋，再通过铜缆入户的方式，适合旧楼改造以及用户密度较低的情况，是过渡性的方案，在一定程度上仍有一定的使用范围。FTTC 把光纤延伸到路边或者交接箱，适合于初期光纤网络的建设。面向企业用户的专线接入一般用点对点光纤直连的方式，保证高可靠性专属带宽。在技术发展的过程中，10G PON 的大规模应用给千兆宽带入户提供技术支持，50G PON 的标准化以及试验部署将会开启万兆接入的新时代^[3]。在接入网光纤化改造过程中，ODN（光分配网络）的规划、建设、管理成了工程难题，必须采用精细化的设计来满足各种场合的覆盖要求。

3.3 移动通信与数据中心应用

光纤通信在移动通信网络中是贯穿于前传、中传和回传各个方面的。5G 高带宽、低时延的要求给前传网络提出很高的要求，光纤直连和无源波分是两种主要的方案。光纤直连方案简单可靠、时延最低，但是光纤消耗量大；无源波分方案利用波分复用技术把多个前传信号复用到一根光纤上，大大节约了光纤资源，是前传网络的优选方案。中传、回传主要使用 IP RAN 和分组传送网技术，用波分复用系统来完成大容量、长距离的传输。光传送网在 5G 承载网中起到底层物理连接的保证作用。数据中心中光纤通信主要用在机架内光互连、机架间互联、数据中心间互联这三个方面。伴随着 AI 大模型训练对于分布式计算的需要增加，数据中心之间的互联带宽和时延的要求也随之提高。绿色低碳数据中心的建设目标使光通信设备在功耗、散热上不断改进，越来越节能高效。随着业界对于算力网络的快速部署，全光算力底座、算力锚点、算力感知等光通信与算力融合的演进路线也成了研究热点。

3.4 新技术与智能化应用拓展

光纤通信技术向着更高的速度、更智能、更广泛的融合方向不断前进。光通信与人工智能的结合是目前的主要趋势，AI 技术被应用到光网络性能预测、故障诊断、资源调度以及运维管理当中，依靠 AI 算法的加持，光网络可以从“被动响应”转变为“主动预防”，从而大幅度提高网络运维效率和可靠性。空分复用技术利用多芯光纤或者少模光纤的多空间信道传输，可以突破现有的单模光纤非线性香农极限，使传输容量得到数量级的提高，是未来超越现有波分复用技术极限的重要研究方向。以机器学习为基础的光网络智能化管控已经成为了新一代光网络运营的主要能力，主要有光性能智能评估、光故障智能定位、光资源智能分配等。此外，光纤通信的应用场景正在向更多领域拓展延伸^[4]。光纤通感算一体化技术把通信、传感、计算三者融合在一起，在智能交通、智慧安防、智慧城市等各个领域都有着非常广阔的应用前景。海底光缆系统依然是海洋通信的主要基础设施，在洲际通信中占据着重要

的位置。光纤传感技术正同光纤通信系统深度融合,用分布式光纤传感来实现对通信信号和外界物理量(温度、应变、振动)的同时感知和传输,给光纤网络赋予环境感知能力。量子通信领域中,光纤是量子密钥分发的主要传输信道,光纤通信技术和量子信息的交叉融合将会产生更多的创新性应用。

4 结语

光纤通信是现代通信网络的物理基础,它的技术发展以及应用扩展都会对信息社会的基础设施建设产生决定性的作用。本文从技术优势出发,对光纤通信在骨干网、城域网、接入网、移动通信承载和数据中心互联等主要应用场景下的应用现状以及存在的主要问题进行了梳理,然后从多层次、多场景的角度对光纤通信的使用情况进行阐述,并且提出了光纤通信的发展趋势。经过研究发现,光纤通信正向着超大容量、超长距离、智能化的方向不断前进,超高速率、超大容量、智能化是它的主要突破方向。未来随着空分复用、智能光网络、光子集成等技术不断取

得突破,光纤通信将从大带宽、低时延、高可靠性的角度为新一代通信网络赋能,给数字经济时代信息传输和算力互联提供强有力的物理层支持。光纤通信同人工智能、云计算、量子信息等新兴领域相融合,会给人类信息通信产业的不断升级和智能化转型提供强大的动力。

[参考文献]

- [1]谢玉卯.现代通信网络技术的创新和应用研究[J].数字通信世界,2021(2):195-196.
- [2]敖珠玮.现代通信网络技术的创新及应用分析[J].信息与电脑(理论版),2017(10):192-194.
- [3]邓新军.光纤通信在通信工程中的难点及解决方案[J].信息记录材料,2026,27(12):97-99.
- [4]高祖慧.光纤通信技术在智能电网的应用及运维[J].中国电力企业管理,2025(36):95-96.

作者简介:王冬(1995—),男,山西长治人,工程师,东北大学毕业,现就职于国网长治供电公司,从事通信运维检修工作。