

光通信网络在智慧城市的应用及技术发展趋势

许敬旭

(中国有线电视网络有限公司, 北京 100142)

摘要: 为探讨光通信网络在智慧城市建设中的关键作用及技术发展趋势, 系统分析了空间激光通信(FSO)、通感一体化(ISAC)光通信网络及可见光通信(VLC)三大技术的应用场景与性能表现, 并基于新型光纤、光电器件制造工艺及量子通信技术的前沿进展, 对其未来发展方向进行了展望。分析结果表明: FSO 在跨域互联与应急通信中展现高传输速率优势, 但受天气影响稳定性不足; ISAC 光通信网络技术通过光纤传感可实现交通、地震等场景的实时监测, 但复杂环境误报率较高; VLC 在室内定位与医疗领域实现厘米级精度与无干扰传输, 但存在硬件成本高的问题。未来, 空芯光纤与多芯光纤的协同架构、光电共封装(CPO)技术及量子密钥分发(QKD)将分别从网络基础、设备互连能效与安全防护三方面推动智慧城市升级。

关键词: 光通信网络; 智慧城市; 新型光通信技术

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)03-0114-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application and technological development trends of optical communication networks in smart cities

XU Jingxu

(China Cable Television Network Co., Ltd., Beijing 100142, China)

Abstract: To explore the critical role and technological trends of optical communication networks in smart city development, this study systematically analyzes the application scenarios and performance of three key technologies: free-space optical communication(FSO), integrated sensing and communication(ISAC) optical networks, and visible light communication(VLC). Furthermore, based on the latest advancements in novel optical fibers, optoelectronic device manufacturing, and quantum communication technologies, future development directions are proposed. The analysis reveals that FSO offers high-speed transmission advantages for cross-domain connectivity and emergency communications but suffers from weather-dependent instability. ISAC-enabled optical networks facilitate real-time monitoring in scenarios such as traffic and seismic activity through fiber-optic sensing, yet exhibit high false alarm rates in complex environments. VLC achieves centimeter-level precision and interference-free transmission in indoor positioning and medical applications but faces challenges in hardware cost. Looking ahead, hybrid hollow-core and multi-core fiber architectures, co-packaged optics(CPO), and quantum key distribution(QKD) are expected to drive smart city advancements in network infrastructure, energy-efficient device interconnection, and security enhancement, respectively.

Key words: optical communication networks, smart city, novel optical communication technologies

0 引言

智慧城市是以光通信网络为基础设施, 融合新一

收稿日期: 2025-01-23。

作者简介: 许敬旭(1978—), 女, 学士, 网络扩改工程师, 主要研究方向为光通信网络、骨干网系统扩容升级改造等, 参与了中国广电 5G/CBNET 等多个建设项目。



代信息技术的创新型城市治理模式, 其技术架构以构建全域覆盖、低时延、高可靠的光通信网络为核心, 支撑城市智能物联感知体系与网络基础设施的协同融合^[1-2]。基于物联网感知层的数据采集、智能网络传输、云计算、大数据融合分析及人工智能决策优化, 智慧城市形成“感知-传输-决策-执行”的闭环运行机制。这一架构重构了城市治理的空间组织与协作模式, 提升公共服务的精准性与时效性, 推动产业体系向数字化、网络化、智能化升级^[3-4]。

光通信网络作为信息传输的核心技术,具备高速率、大容量、低时延、高可靠性和强抗干扰性等特点^[5-6],是智慧城市发展的关键支撑。随着技术持续革新,光通信网络正向智能光网络演进,信号传输技术呈现综合化、宽带化与智能化趋势^[7],为智慧城市各类应用提供坚实基础^[8]。

本文从空间激光通信(FSO)网络、通感一体化光通信网络技术及可见光通信(VLC)网络等维度出发,系统探讨这些光网络技术在智慧城市中的多场景应用。

1 光通信网络在智慧城市中的多场景应用

1.1 FSO 网络

随着通信技术和微电子技术的发展,智慧城市通信网络正从传统地基“平面化网络”向天地一体化“立体化网络”转型。FSO 网络通过构建星间及空天地一体化激光通信链路,为跨区域数据传输提供了创新解决方案^[9-10]。相比传统光纤通信,FSO 网络无需铺设物理光纤,具有环境适应性强、传输速率高的特点,在广域覆盖和无差别通信服务方面优势显著,尤其适用于地面网络覆盖不足或布设困难的场景^[11]。FSO 网络在智慧城市中主要应用于以下三大场景:

短距跨域互联:实现短距离跨区域高速互联。美国 Trimble 公司的 FSO 网络系统支持 4 km 内高速稳定传输,其抗干扰性能优于传统微波通信系统,已成功应用于军事野外训练的实时数据共享^[12]。国内蓝星光域(上海)航天科技有限公司与中国联通于 2025 年 1 月部署了基于 FSO 网络的 10G 无源光网络,跨越太湖实现岛域高速回传,解决了传统通信方式在岛屿环境中的局限性,但在极端天气下仍存在传输不稳定的问题^[13]。

应急通信保障:在自然灾害或光纤损毁等突发情况下,FSO 网络可快速建立临时通信网络。中国联通 YH-630 低空应急通信指挥系统基于无人机平台,在广东韶关洪涝、海南文昌台风灾害救援中迅速恢复灾区通信^[14]。

卫星互联网接入:作为空间激光中继节点,构建天地一体化 FSO 网络枢纽,实现星地高速数据传输^[15]。大容量卫星光互联网为高分辨率遥感数据提供传输链路,助力城市管理决策^[16]。在智能驾驶领域,FSO 网络与北斗/第五代移动通信进阶版(5G-A)融合,通过超低时延、亚米级定位等技术,支持车路协同场景下的实时信息交互。实验测试已初步验证其可行性,未来随着低轨星座规模化部署,有望实现全球车辆实时协

同驾驶^[17-18]。

1.2 通感一体化光通信网络

智慧城市的发展依赖于新一代信息通信技术和物联网技术,以实现动态感知、实时分析和智慧服务。在此背景下,通信与感知功能的一体化设计成为构建智能化、多场景融合通信系统的必然趋势。通感一体化光通信网络通过将通信与感知功能深度融合,既能提升光纤资源利用率,又能满足 5G/6G、智算中心等对智能化运维的需求^[19]。

该网络以光纤为传输介质,在支持高速、大容量数据传输的同时,赋予光纤环境感知能力。基于分布式光纤传感(DFOS)技术,可实时监测温度、应变、振动等物理参数,使光通信网络兼具通信基座和智能感知网络的双重功能。该技术在智慧城市中主要应用于以下三大场景:

智慧交通:2021 年,意大利安格里市首次利用 DFOS 技术进行交通监测实验,但 1 h 内 456 辆车辆的检测成功率仅 73%,主要受车辆类型、速度及路面条件影响^[20]。2022 年,鄂州机场高速公路引入 DFOS 技术,结合光栅阵列传感光缆(1.6×10^4 个光栅传感器)及毫米波雷达、激光雷达等设备,实现车辆全息数据绑定与全域跟踪,检测成功率显著提升,但复杂天气下数据丢包率仍达 15%^[21]。

地震检测:2020 年,谷歌利用海底光缆检测牙买加附近 7.7 级地震,但定位精度仅 10 km 级,且无法区分地震类型^[22]。2021 年,美国加州理工学院在复杂地质条件下布设 100 km 陆地光缆,实验数据与 6 级地震吻合度达 89%,但预警延迟超过 15 min^[23]。2022 年,武汉光迅在雅安试验中实现秒级响应,但误报率达 12%,且无法区分 P 波/S 波^[24]。2024 年,光迅联合浙江电信部署的光引擎传感处理器实现台湾花莲 7.3 级地震实时监测(定位误差小于 1 km),但山地环境中的信号衰减率超 25%^[25]。

城市管道监测:DFOS 技术通过检测光信号相位变化,可定位油气管道沿线的安全威胁(如挖掘机、重型卡车等),相比传统人工巡检,能覆盖复杂地形盲区,提升响应效率。华为在地下管线中部署该技术,实现 7×24 h 自动巡检,但存在环境噪声干扰大、复杂地形信号衰减快、误报率高等问题^[26]。未来可通过空分复用光纤、优化智能算法(如自监督学习框架)等进一步提升性能。

1.3 VLC 网络

VLC 技术兼具高集成度、高速率及高安全性等优

许敬旭: 光通信网络在智慧城市的应用及技术发展趋势

势,尤其适用于解决室内、地下空间及特定区域的射频信号覆盖盲区问题。其“通信+照明”双重功能为智慧城市建设提供了集成化创新方案,具有广阔的应用前景^[27-30]。

在室内定位领域,基于 VLC 网络的可见光定位(VLP)技术利用 LED 的高带宽特性,实现厘米级高精度定位。例如,北京科技大学王玮团队^[31]提出一种基于误差矢量幅度的资源分配优化方法,在实验环境下实现了 3 cm 的平均定位精度;武汉大学 YANG X 等人^[32]开发了惯性导航辅助的非调制 VLP 系统,通过动态调整 LED 亮度,将误差降至 0.36 cm^[33]。该 VLC 网络系统可弥补室内无线信号盲区,提供精准定位和智慧导航服务。

在工业场景中,成都工业学院严丹丹等人^[34]设计了基于 VLC 网络(光保真, Li-Fi)的井下人员定位系统,借助顶部 LED 灯与矿工携带的 LED 矿灯实现实时轨迹跟踪,提升了矿井安全管理效率。

在智慧交通方面,兰州交通大学张雁鹏等人^[35]提出融合 VLC 网络与双目视觉的列车自主定位方法,解决了射频通信的电磁干扰问题。实验表明,在 100 km/h 列车速度下,该系统定位误差为 36.11 cm,响应时间为 51.32 ms,初步实现了高速动态定位,但仍需进一步提升精度。

在医疗领域,清华大学杨海军等人^[36]开发了基于 VLC 网络的数字化手术室方案,通过无影灯实现手术数据高速稳定传输,避免了传统射频通信对医疗设备的干扰。

2 新型光通信技术在智慧城市建设的展望

智慧城市建设需要支撑海量连接、超低时延、超高安全性的新型光通信技术。在上述需求的驱动下,新型光纤技术、新型光电器件制造工艺和量子通信技术三大方向的关键突破成为智慧城市发展的重要支撑。它们通过构建高速泛在的传输网络、提升系统集成度及智能化程度,推动城市管理效率、公共安全及产业升级。

2.1 新型光纤

空芯光纤与多芯光纤作为新型光纤技术的代表,通过结构创新和性能突破,正在重构智慧城市光通信网络的底层架构,并推动其性能向更高维度跃迁。空芯光纤基于反谐振导光机理,以空气为传输介质,具有传输损耗低、时延小等优势^[37-38]。2025 年 3 月 30 日长飞公司在国际光纤通信会议及博览会(OFC)展示了

最新空芯光纤产品,单根光纤长度超过 20 km,最低衰减系数低至 0.05 dB/km,信号传输速度相比常规光纤快大约 47%,传输时延降低约 31%^[39]。空芯光纤凭借优越的超低时延、超低损耗、超低非线性、超宽可用频谱等颠覆性特征,成为构建下一代光网络的潜在核心技术^[40-41],为骨干网长距离传输提供了突破性解决方案,可显著提升跨区域数据交互效率,支撑智慧城市广域感知与实时控制需求。

多芯光纤则通过单包层多纤芯设计实现空分复用,在保持光纤直径不变的前提下成倍提升传输容量,适用于短距离高密度接入场景(如数据中心互联、物联网汇聚节点),其空间效率优势可有效缓解光纤资源紧张问题,降低网络建设成本。此外,多芯光纤通过集成 DFOS 功能,能够实时监测道路塌陷、地下管线破损等隐患,具备超大容量、高密度通信和智能化感知能力。

展望未来,多芯光纤与空芯光纤将形成“短距接入-长距传输”的分层协同架构;多芯光纤支撑智慧城市局部区域的高密度数据交互,空芯光纤则构建跨城市、跨区域的超高速骨干网络,二者结合可满足智慧交通、工业互联网等场景对大带宽、低时延的严苛需求^[41-42]。同时,随着新型光纤制备技术提升,生产成本下降,新型光纤作为光通信网络的核心基础设施,将助力构建高效、安全、绿色的未来智慧城市生态。

2.2 新型光电器件制造工艺技术

新型光通信网络的快速发展,正驱动城市治理模式向智能化转型。其中,人工智能(AI)大模型在交通优化、环境监测、公共安全等领域的深度应用显著提升了城市运行效率和智能化水平^[43]。AI 大模型的训练与推理对算力基础设施提出严苛要求,单次训练需消耗数万块图形处理器,网络带宽与算力调度成为瓶颈。在此背景下,新型光电核心器件亟需向高速率、高集成、低延迟及低功耗方向演进,而光电共封装(CPO)、线性驱动可插拔光学(LPO)、硅光等新技术正成为破局关键。

CPO 技术通过将光源与电芯片直接集成于同一封装体,大幅缩短光信号传输路径,显著降低传输损耗与功耗,尤其适配 AI 集群的高密度互联需求。LPO 技术则通过移除高功耗数字信号处理器芯片,改用线性驱动直接处理信号,在保持低功耗的同时实现成本优化,适用于数据中心短距传输场景^[44]。硅光技术依托互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺实现光电器件大规模集成,其光/电转换效率较传统方案提升 40%,且具

备与集成电路兼容的量产优势,成为下一代光模块的核心技术路径。

未来,新型光电器件制造工艺将形成“短距 LPO+中长距 CPO+硅光底层支撑”的技术矩阵,为 AI 智算中心提供超低时延、超高带宽的光电器件保障,助力智慧城市实现高速响应的实时决策能力,为智慧城市中海量数据的传输和交互提供可靠基础,以支撑智慧城市的建设。

2.3 量子通信

AI 大模型在智慧城市中的广泛应用,依赖于海量终端设备和敏感数据的交互支持,由此带来的数据隐私泄露和网络攻击风险也日益严峻^[45]。量子通信技术凭借量子力学基本原理,为智慧城市构建起坚不可摧的安全屏障。量子密钥分发(QKD)技术基于光子的不可克隆性和测不准原理,可实现无条件安全的密钥协商,与经典加密算法结合后,能为智慧城市建设中政务、金融、医疗等关键领域建立不可破解的通信链路,彻底杜绝中间人攻击和数据篡改风险^[46]。

从长远来看,光通信与量子通信的深度融合将成为智慧城市安全体系的核心支撑。通过部署 QKD 网络,敏感数据在传输过程中可获得动态密钥保护,确保城市物联网系统免受攻击威胁。连续变量量子密钥分发技术在城域网和接入网场景中兼具高速率、高兼容性、低成本和易扩展性,特别适用于智慧城市密集接入场景的安全防护。此外,随着量子中继技术的突破和小型化终端的研发,量子通信网络将向更广覆盖、更低成本方向演进,最终形成覆盖政务专网、工业互联网、智能交通等领域的立体化安全防护体系,为智慧城市的可持续发展提供坚实的安全保障。

3 结束语

本文探讨了光通信网络在智慧城市建设中的关键作用及技术发展趋势。光通信网络作为智慧城市的核心基础设施,其技术演进直接影响城市治理的智能化水平。FSO 在跨域互联和应急通信中展现出高传输速率优势,但受天气影响稳定性不足;通感一体化技术通过光纤传感实现交通监测、地震预警等功能,但在复杂环境下误报率较高,需进一步降低;VLC 在室内高精度定位和医疗数据传输方面具备独特优势,但硬件成本制约其大规模部署。此外空芯光纤与多芯光纤的协同架构、CPO 技术及 QKD 技术分别从网络基础架构、设备互联能效与通信安全防护 3 个维度,推动智慧城市向更高效、更安全的方向发展。

综上所述,光通信技术将持续推动智慧城市的创新发展,未来需结合新材料、新工艺和智能算法突破现有技术瓶颈,构建更高效、更安全、更智能的城市通信网络。

参考文献:

- [1] 朱敦海. 基于光通信技术的智慧城市光纤网络设计与应用研究[J]. 长江信息通信, 2023, 36(6): 177-179.
- [2] 舒文琼. 4G/5G、物联网和光通信等多领域发力中国移动打造绿色智慧雄安新城[J]. 通信世界, 2018(14): 16-17.
- [3] 底蕴深厚的“光通信专家”[J]. 现代传输, 2017(S2): 17-19.
- [4] 田宇航. 可见光通信的发展与应用[J]. 数字通信世界, 2017(12): 182-188.
- [5] 原荣. 光纤通信技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [6] 张景. 光波分复用技术在光纤传输中的现状与应用[J]. 信息系统工程, 2021(10): 29-31.
- [7] 谢建军. 光纤通信的发展趋势及应用研究[J]. 科技与创新, 2021, 2(10): 1-8.
- [8] 张蕊, 赵景晖. 智能光网络技术的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(9): 5-6.
- [9] 程洪玮, 佟首峰, 张鹏, 等. 卫星激光通信总体技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [10] 鲁绍文, 侯霞, 李国通, 等. 空间光通信技术发展现状及趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(2): 39-46.
- [11] 王天枢, 林鹏, 董芳, 等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92-99.
- [12] 董全睿, 陈涛, 高世杰, 等. 星载激光通信技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1260-1270.
- [13] 讯石光通讯网. 中国联通首条自由空间光承载业务顺利开通[EB/OL]. [2025-04-02]. <http://www.iccsz.com//Site/CN/News/2025/02/05/20250205082916181689.htm>.
- [14] 数联低空智通未来中国联通“低空黑科技”惊艳亮相峰会[N]. 福建日报, 2025-04-29(6).
- [15] 梁静远, 亢维龙, 董壮, 等. 自由空间光通信系统光学天线技术研究进展[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 1-10.
- [16] 赵永利, 马壮壮, 井音吉, 等. 高动态卫星激光组网关键技术研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(8): 8-13.
- [17] 倪思洁. 卫星数据通信从“单车道”步入“千车道”[N]. 中国科学报, 2024-09-18(1).
- [18] 郭冀川, 李乔宇. 5G-A 网络商业化加速: 智能驾驶、低空经济迎来黄金发展期[N]. 证券日报, 2025-05-12(A01).
- [19] 欧阳站, 刘承达, 秦祖军, 等. Φ -OTDR 系统的振动信号检测和识别算法[J]. 光通信技术, 2020, 44(3): 37-40.
- [20] CATALANO E, COSCETTA A, CERRI E, et al. Automatic traffic monitoring by Φ -OTDR data and hough transform in a real-field environment[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3579-3584.
- [21] 张再武, 夏隽, 罗如意, 等. 鄂州机场高速的“聪明”之处——混合流下湖北首条智慧高速的探索与实践[J]. 中国公路, 2022, (12): 56-59.
- [22] 科企岛(上海)网络技术有限公司. 科学家计划如何使用光纤技术来探测地震和潮汐[EB/OL]. [2025-01-16]. <https://www.keqidao.com/detail/>

许敬旭: 光通信网络在智慧城市的应用及技术发展趋势

- id=241595431583764.
- [23] LI J, KIM T, BIONDI E, et al. The break of earthquake asperities imaged by distributed acoustic sensing[J]. *Nature*, 2023, 597: 548–553.
- [24] 光纤网络未来可望“预警天灾”, 光迅科技成功研发地震监测新技术[EB/OL]. [2025-01-16]. https://www.sohu.com/a/711265786_121124378.
- [25] 光迅科技“感知和通信融合”技术赋能地震监测[EB/OL]. [2025-01-16]. https://www.sohu.com/a/771654687_121124378.
- [26] 张驰. 华为管线光纤预警解决方案, 助力济华燃气提升管道巡检效率[J]. *能源*, 2022(5): 56–57.
- [27] 张平, 陈岩, 吴超楠. 6G: 新一代移动通信技术发展态势及展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(6): 1–8.
- [28] 中国移动通信有限公司研究院. 6G 可见光通信技术白皮书[R]. 北京: 中国移动通信有限公司研究院, 2022.
- [29] 林德平, 彭涛, 刘春平. 6G 愿景需求、网络架构和关键技术展望[J]. *信息通信技术与政策*, 2021, 47(1): 82–89.
- [30] 梁静远, 徐亚欣, 韩美苗, 等. 室内可见光通信异构融合系统研究进展[J]. *光通信技术*, 2023, 47(1): 46–50.
- [31] 王玮, 王建萍, 冯莉芳, 等. 基于可见光的通信定位一体化技术研究[J]. *电信科学*, 2023, 39(5): 57–66.
- [32] YANG X, ZHANG H, ZHUANG Y, et al. uLiDR: an inertial-assisted unmodulated visible light positioning system for smartphone-based pedestrian navigation[J]. *Information Fusion*, 2025, 113: 1566–2535.
- [33] 蒋菲. 面向中大型仓库的可见光通信系统目标定位[J]. *光通信技术*, 2025, 49(3): 1–9.
- [34] 严丹丹, 刘兴鹏, 熊建. 基于 LiFi 的矿下作业人员跟踪定位系统[J]. *光通信技术*, 2019, 43(5): 36–39.
- [35] 张雁鹏, 孟楠, 肖夏, 等. 融合可见光通信与双目立体视觉的地铁列车自主定位[J]. *光学学报*, 2023, 43(10): 17–28.
- [36] 杨海军, 张国栋, 乌峰, 等. 可见光通信技术在数字化手术室中的应用[J]. *实验技术与管理*, 2025, 42(2): 15–20.
- [37] CHEN Y, PETROVICH M N, FOKOUA E N, et al. Hollow core DNANF optical fiber with <0.11 dB/km loss[C]//IEEE. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)*. San Diego: IEEE, 2024: Th4A.8-1–Th4A.8-3.
- [38] SHEN W H, DU J B, SUN L, et al. Low-latency and high-speed hollow-core fiber optical interconnection at 2-micron waveband[J]. *Journal of Light wave Technology*, 2020, 38(15): 3874–3882.
- [39] 长飞光纤光缆股份有限公司. 长飞及光纤国重发布最低损耗 0.05 dB/km 的空芯光纤重大研究成果[EB/OL]. [2025-04-02]. <https://www.yofc.com/view/4724.html>.
- [40] 张玉乾, 葛大伟, 左铭青, 等. 反谐振空芯光纤颠覆性技术的探索与应用[J]. *通信世界*, 2025(4): 38–42.
- [41] 苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 171–195.
- [42] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 82–99.
- [43] 董正浩. AI 大模型在智慧城市领域的应用与前景[J]. *通信世界*, 2023(17): 39–40.
- [44] 卞玲艳, 曾燕萍, 蔡莹, 等. 大数据时代光电共封技术的机遇与挑战[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(9): 77–88.
- [45] 郑建华. 智慧城市建设与信息安全[J]. *网信军民融合*, 2018(7): 9–11.
- [46] 张一辰, 边一铭, 王恒, 等. 面向城域接入的连续变量量子密钥分发技术[J]. *信息通信技术与政策*, 2023, 49(7): 53–59.