

自由空间光通信在5G网络中的应用与试验研究

Application and Experimental Research of FSO in 5G Networks

窦中兆¹,周宏¹,曾云光²(1. 中国电信国际有限公司,香港 999077;2. 广东省电信规划设计院有限公司,广东 广州 510630)
Dou ZhongZhao¹,Zhou Hong¹,Zeng Yunguang²(1. China Telecom International Co.,Ltd.,Hongkong 999077,China;2. Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co.,Ltd.,Guangzhou 510630,China)

摘要:

自由空间光通信(FSO)利用激光或LED光束在自由空间中传输数据,具备高带宽、低时延、免频谱许可及快速部署等优势。探讨了FSO的基本原理、关键技术及优化策略。通过2.1 km链路测试验证其高可用性(>99.9%)及10 Gbit/s的吞吐能力,并在不同天气条件下进行试验,评估其性能,提出适应不同气候环境的优化策略。FSO对4G/5G网络的关键性能指标无显著影响,未来结合AI、THz及量子加密技术,有望在6G网络中发挥更大作用。

关键词:

FSO;激光通信;大气衰减;波束跟踪;自适应光学;链路预算;多波长传输;混合通信网络
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.04.007
文章编号:1007-3043(2026)04-0039-07
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Free Space Optical (FSO) communication uses laser or LED beams to transmit data in free space, offering advantages such as high bandwidth, low latency, spectrum license-free operation, and rapid deployment. It explores the fundamental principles, key technologies, and optimization strategies of FSO. A 2.1 km link test validates its high availability (>99.9%) and 10 Gbit/s throughput capability. Experiments under different weather conditions assess its performance, and optimization strategies are proposed to enhance adaptability to various climatic environments. FSO has no significant impact on the key performance indicators (KPIs) of 4G/5G networks. In the future, by integrating AI, THz, and quantum encryption technologies, FSO is expected to play a more significant role in 6G networks.

Keywords:

FSO; Laser communication; Atmospheric attenuation; Beam tracking; Adaptive optics; Link budget; Multi-wavelength transmission; Hybrid communication network

引用格式:窦中兆,周宏,曾云光. 自由空间光通信在5G网络中的应用与试验研究[J]. 邮电设计技术,2026(4):39-45.

1 概述

随着通信技术的快速发展,尤其是5G网络的规模部署,对高速、高带宽的通信需求日益增加。传统的光纤通信面临施工成本高、部署周期长等问题,而自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO)技术作为“无线光纤”方案^[1],因其高带宽、低延迟、无需频谱许可证等优势,逐渐成为光纤通信的有

力补充,可实现高达25 Gbit/s的传输速率,提供光纤级别的通信速率^[2],同时避免挖掘道路、铺设光缆等限制。近年来,FSO技术在全球范围内受到越来越多的关注,并在企业、政府、军队、通信等多个行业中得到应用。

本文旨在系统探讨FSO技术的基本原理、关键技术及其在5G网络中的潜在应用^[3]。通过理论分析、工程设计及实际验证,深入研究了FSO系统的链路预算、大气衰减补偿策略及优化方案,为未来FSO技术的广泛应用提供了理论依据和实践参考。

收稿日期:2026-03-11

随着5G网络规模化部署,FSO通信作为高带宽、低时延回传/前传手段的重要性日益凸显。近年来,针对FSO在5G网络中应用的研究不断深入,涵盖链路动态优化、恶劣天气补偿及智能调度等方向^[4-5]。部分前沿研究还初步探讨了面向6G的FSO与空天地一体网络融合的可行性,但目前仍以5G场景下的地面接入和基站互联应用为主。本文结合最新研究成果,重点分析FSO在5G系统中的应用需求、技术优化及工程验证,旨在为5G无线网络提供有效的光通信补充方案。

2 自由空间光通信原理

FSO利用光信号在空气、真空或外层空间进行点对点数据传输,由发射端(包括光源和调制设备)、接收端(光探测器)以及光学传输路径组成(见图1)。其无需物理光纤作为传输介质,适用于多种应用场景。

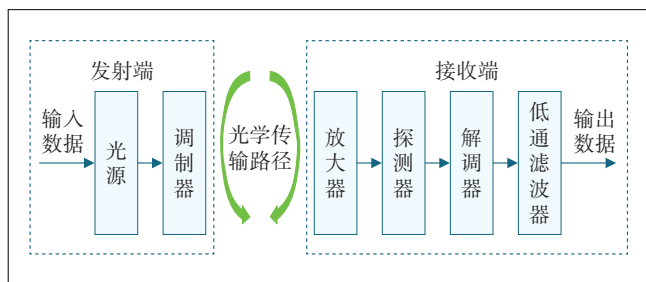


图1 自由空间光通信系统框图

系统采用激光二极管(LD)或发光二极管(LED)作为光源,通过对信号进行调制,使其以数字或模拟形式承载数据,并通过空气等介质传输至接收端。接收端利用光电探测器(如APD雪崩光电二极管或PIN光电二极管)对光信号进行捕获和解调,以恢复原始数据。

3 FSO关键技术

3.1 传输波长

3.1.1 可用波长

FSO系统的传输波长影响其性能、传输距离和环境适应性。不同波长具有不同的穿透性、散射性和大气适应能力。表1列出了FSO常用波长及其特性。

3.1.2 主流波长

FSO的工作波长通常位于红外和可见光区域,常用波长包括850 nm、1 064 nm和1 550 nm,它们各具不同特性。

a) 850 nm(近红外 NIR)。设备成本低,但受大气

表1 FSO系统常用传输波长及特性

频段	波长范围/nm	对应频率/THz	说明
近红外(NIR)	750~1600	200~400	主流FSO波段,大气窗口透射率高,适用于大气传播
远红外(FIR)	8 000~15 000	20~37.5	受水蒸气影响较大,不常用于地面FSO
可见光(VIS)	400~700	430~750	少用,多用于短距离光通信(如Li-Fi)

湍流影响较大,恶劣天气下稳定性较差。

b) 1 550 nm(C波段)。适用于远距通信,具较高人眼安全性,水汽吸收影响小,是FSO的优选波长。

c) 1 064 nm(Nd:YAG激光)。常用于卫星通信,具备高功率输出和强抗干扰能力,在特定应用场景表现优异。

FSO波长的选择需综合考虑传输距离、环境影响、安全性及成本等因素,以确保系统可靠性。

3.2 波束跟踪与对准技术

FSO波束跟踪与对准技术旨在提高发射端与接收端光束对准精度,确保通信稳定性。由于FSO系统使用窄光束传输,微小位移或角度偏差都会降低链路质量,甚至导致失信号,因此需精准对准和高效跟踪。

a) 波束对准。通过机械调整(如万向架、MEMS微镜)或光学扫描,使发射光束精确对准接收端,并利用光电探测器反馈误差,实现精细校正,确保初始链路建立。

b) 波束跟踪。采用光学传感器(如QPD、CCD)实时检测光束偏移,并通过反馈控制系统驱动调整机构(如MEMS微镜、自适应光学),抵御大气湍流、振动等干扰,维持稳定通信。

3.3 调制技术

FSO系统采用多种调制方式以适应不同应用需求,包括如下几种常见方式。

a) 开关键控(OOK)。结构简单、能耗低,适用于短距局域网络。

b) 相移键控(PSK)。抗干扰性强,适合远距通信,但检测技术要求高。

c) 脉冲位置调制(PPM)。抗噪能力强,适用于深空通信,载波低且带宽需求大。

d) 正交振幅调制(QAM)。频谱利用率高,适用于数据中心互联等大数据吞吐场景。

调制技术的选择需考虑传输环境、带宽需求、抗干扰能力及系统复杂度,以确保通信的可靠性和高效性。

3.4 大气湍流补偿技术

大气湍流补偿技术旨在减轻大气湍流对光信号的干扰,提高通信链路的稳定性和可靠性。大气湍流会导致光束闪烁、光束漂移、波前畸变和信号衰落,影响通信质量。主要的补偿技术有自适应光学、多光束传输、分集接收等。

4 FSO的技术优势

FSO技术凭借其卓越的特性,在高速、低时延的通信需求场景中展现出巨大潜力。其主要优势体现在以下几个方面^[6]。

a) 高速传输。FSO技术能够实现高达10 Gbit/s的数据传输速率,可充分满足5G及未来网络对高吞吐率通信的需求,在大容量数据传输中具有明显优势。

b) 低时延。FSO技术具有极低的延迟特性,特别适用于对时延敏感的应用场景,例如自动驾驶系统和工业级远程控制等领域。

c) 无需频谱许可。FSO通信采用红外或可见光波段进行数据传输,避免了传统无线通信对频谱资源的依赖,可在全球范围内灵活部署,同时不会产生无线电干扰问题,有助于降低运营成本。

d) 快速部署与灵活性。安装便捷,可在短时间内完成网络搭建,尤其适用于突发性或临时性的通信需求,如应急通信保障和灾害恢复等场景。

e) 高安全性。FSO的光束极难被外部探测或窃听,使其在信息安全性要求较高的应用中具有独特优势,例如军事通信和金融数据传输等。

FSO技术凭借其高带宽、低时延和较强的抗干扰能力,可在多种无线通信场景中发挥重要作用,包括城市无线骨干网、卫星通信以及高楼间的数据传输等。

5 大气影响及补偿

5.1 大气影响

FSO在基站回传(Backhaul)和前传(Fronthaul)中应用广泛,但其可用度(99%~99.9%)通常受限于天气条件,尤其是雾、雨、雪、大气湍流等因素^[7](见图2和表2)。依据ITU-R P.1817(2021)标准^[7],不同气象条件下的衰减系数可作为链路预算和可靠性分析的重要参考。例如,轻雾条件下的典型衰减可达7.66 dB/km,暴雨条件下可高达24.32 dB/km。

然而,随着5G网络中对超可靠低时延通信



图2 大气条件对FSO在基站回传中的影响

表2 大气条件对FSO在基站回传中的影响分析

影响方面	具体问题	影响严重度
回传链路中断	雾、雨等天气可能导致FSO链路中断,从而导致基站中断	★★★★ (严重)
时延抖动(Latency Jitter)	FSO信号质量波动可能导致时延不稳定,影响5G超低时延业务(如自动驾驶、工业控制)	★★★ (中等)
吞吐量下降	大气湍流引发高衰减,降低FSO数据吞吐量,影响5G大带宽业务(如高清视频、VR/AR)	★★★ (中等)
备份链路切换	FSO不可用时,需切换至光纤或毫米波备份链路,可能引发瞬时丢包或切换时延	★★ (较低)

(uRLLC)及大带宽需求的提升,传统基于能见度估算的衰减模型已难以覆盖复杂多变的实际环境。近年来,有研究提出利用机器学习辅助的大气信道建模方法,能在不同气象参数(湿度、温度、风速)变化下,动态优化FSO链路性能预测^[5]。这类新兴方法可在未来高动态、复杂场景下进一步提升FSO链路的稳定性与精度。

因此,本文在链路设计与试验测试过程中,兼顾了基于标准模型的大气衰减余量分析,同时结合动态链路监测与自适应调整策略,以保障FSO系统在多种典型气象条件下的高可用性和低时延特性。

除链路中断和吞吐下降外,“时延抖动(Jitter)”也是FSO链路中影响5G QoS的关键指标。其对工业控制、语音通话、自动驾驶、AR/VR等延迟敏感业务有显著影响。在试验中,FSO系统的平均抖动仅为0.01 μs,表现良好,但在高湍流环境下可能会造成业务卡顿或语音断裂。因此,在FSO设计中建议优先采用低延迟抗抖动调制方式(如PPM+纠错)及QoS感知型功率控制算法。

5.2 补偿策略

FSO系统易受大气环境的影响,诸如雨、雾、雪以及湍流可能会导致信号衰减,从而影响链路性能。为

减少这些影响,常采用以下补偿策略^[8]。

a) 自适应功率控制(APC)。根据实时天气状况动态调整光信号的发射功率,以增强链路的稳定性。

b) 波长多样性(Wavelength Diversity)。采用多个不同的波长进行传输,并增大光接收天线有效孔径,以提升系统在复杂气象条件下的稳定性和可用性。

c) 混合 FSO 方案^[9](Hybrid FSO)。将毫米波或光纤作为冗余路径,提高整体网络的可靠性,确保通信不中断。

通过这些补偿技术,FSO 系统能够在多变的天气环境中维持较高的传输质量,确保通信链路的可靠性和稳定性。

6 工程设计关键考量

在 FSO 系统的设计过程中,为了确保链路的稳定性和传输质量,需要综合评估多个关键因素,包括链路预算计算、传输距离、对准精度、安全性以及环境适应性等。

6.1 链路预算及接收功率计算

在工程设计中,当 FSO 设备安装位置及传输距离确定后,重点在于确保链路在气候变化下仍满足电信级标准的性能要求,而非设备具体的部署位置。

6.1.1 参数说明

6.1.1.1 大气衰落的计算^[10]

激光在大气中传播会产生衰减,FSO 接收端探测灵敏度受限。结合 FSO 设备发射功率、接收器灵敏度、几何布局及设备自身损耗特性,可评估不同型号 FSO 设备在空间链路中的功率情况。

大气衰落余量(dB) = 发射器功率(dBm) - 接收器灵敏度(dBm) - 设备衰耗(dB) - 几何衰耗(dB)。其中,设备衰耗取决于设备的特性和透镜的质量;几何衰耗是由光束发散及接收角限制导致的信号损失,与接收面有效尺寸及光束位置覆盖面积相关。

通过分析大气衰减余量数据,可评估不同气象条件下链路传输的信号损耗,并结合设备部署区的气象数据,判断传输距离稳定性。表3所示为各类天气条件下光信号的大气衰减特性。

6.1.1.2 接收功率计算

FSO 链路的接收功率主要受发射功率、几何损耗、大气衰减以及设备效率影响,计算公式如下:

$$P_L = P_0 \eta_T \eta_R e^{-\alpha L} \left(\frac{d_R}{\theta_L \times L} \right)^2 \quad (1)$$

表3 各类天气条件下光信号的大气衰减特性

天气状况	能见度/km	衰减系数/(dB/km)	天气状况	能见度/km	衰减系数/(dB/km)
非常晴朗	50	0.24	中雨/薄雾	2	6.08
晴天	20	0.61	大雨/小雪/轻雾	1	12.16
小雨	10	1.22	暴雨/中雪/中雾	0.5	24.32
小到中雨	4	3.04	大暴雨/大雪/浓雾	<0.2	60.79

注:以上数据针对波长1550 nm的近红外光计算所得。衰减计算方式较为直观,首先计算链路在不同气象条件下的总衰耗:S(dB)=单位距离衰耗(dB/km)×传输链路长度(km),然后通过对比S与预测结果,确定最不利但余量足够的气象条件,判断链路稳定性。

其中, P_0 为发射功率(W或dBm), η_T 和 η_R 为发射和接收天线效率(通常为0.8~0.95), d_R 为接收天线口径(m), L 为传输距离(km), α_L 为大气衰减系数(dB/km), θ_L 为光源发散角(mrad), $e^{-\alpha L}$ 为大气吸收和散射损耗,

$\left(\frac{d_R}{\theta_L \times L} \right)^2$ 为几何损耗。

将接收功率与设备的接收门限进行对比,接收功率大于接收门限,即可视为该链路可稳定运行。

6.1.1.3 链路可行性判断准则

链路可行性判断准则为:满足接收功率大于门限,且大气衰减余量达标,才能确保链路在最恶劣环境下稳定运行。

6.1.2 链路预算结果

FSO 链路距离为2.1 km,采用多光束传输(4T4R),其在大雨和轻雾的天气情况下的链路预算如表4所示。

链路预算结果显示:当 FSO 在大气衰落余量和接收功率方面均满足要求时,年可用度达99.74%。

6.2 对准精度要求

由于 FSO 采用窄波束传输信号,因此光束的对准精度对系统性能影响极大。高精度的光束对准和稳定的光学跟踪系统能够减少光束漂移,提高链路的稳定性,避免因光束偏移导致信号丢失。

6.3 安全性与标准合规

FSO 由于采用光波进行数据传输,具有较高的抗窃听能力。然而,在高功率激光设备的使用中,仍需遵守国际标准(如 IEC 60825-1 激光安全标准),以保障设备操作的安全性,并避免对人员和环境造成潜在风险。

6.4 其他注意事项

6.4.1 链路选择注意事项

在选择通信链路时,通信链路之间应无任何遮挡

表4 FSO链路预算表

参数	取值	备注
光学天线发散角(θ_L)/mrad	2	-
传输距离(L)/m	2 100	-
光斑的直径(D_T)/m	4.20	$L \times \text{ATAN}(\theta_L/2)$
发射功率(P_0)/mW	200	-
接收器灵敏度(S)/dBm	-42	-
固有衰减(L_{sys})/dB	4	-
系统衰落余量(FM)/dB	61.0	$10\lg(P_0) - L_{\text{sys}} - S$
透镜接收直径 d_R /mm	80	-
MIMO方式(N)	4T4R	-
耦合效率(η)	0.001	$(d_R/D_T)^2 \times N$
几何衰减(L_G)/dB	30	$-10\lg(\eta)$
大气衰落余量(AFM)/dB	31.01	-
波长/nm	1 550	-
雾霾状况/km	轻雾	-
能见度(V)/km	1	-
雾霾衰减系数 γ_{fog} /(dB/km)	7.66	$17/V \times (\lambda/550)^{-0.77}$
雨区	P	-
降雨衰减系数 γ_{rain} /(dB/km)	0.014 5	$k \times R^a$
降雪类型	干雪	-
降雪强度 R_{snow} /(mm/km)	0	-
降雪衰减系数 γ_{snow} /(dB/km)	0.00	$a \times R^b$
综合衰减系数 γ_{total} /(dB/km)	7.67	-
大气衰减值(L_{loss})/dB	16.11	$L \times \gamma_{\text{total}}$
链路是否满足	Y	$\text{AFM} \geq L_{\text{loss}}$
发射端效率 η_T	0.85	-
接收端效率 η_R	0.85	-
自然对数衰减系数 α	1.77	$\gamma_1 \times \ln(10)/10$
接收功率 P_L /dBm	-28.95	-
链路是否满足	Y	$P_L \geq S$
链路是否可行	Y	-
年可用度/%	99.92	-

物,也不能存在任何可能遮挡的因素(如设备不能安装在链路中间可能有人通过的路面、楼层等);通信链路之间无任何可能引起大气波动的因素,如烟筒、蒸汽排放口等;光学天线不能安装在周围有强烈振动的物体旁边(如电梯控制室、大型通风机、空调等)。

6.4.2 安装注意事项

光学天线应安装在牢固可靠的基础上,如大楼、铁塔等;两端光学天线之间的高度差不能太大,光学天线的俯仰角尽量小于 30° ;应考虑激光束链路方向和太阳的方位角及高度角的相对位置关系,尽量避免光学天线直接对着强烈的太阳光安装;若在同一地点并行架设2套天线,则2套天线之间的距离不得小于

10 m。

6.5 远距离与海平面FSO链路设计

在远距离(如5 km以上)或海平面环境(如岛屿间连接)部署FSO时,链路设计需重点考虑以下因素。

a) 蒸发层湍流增强。海平面环境蒸发层产生的强烈湍流,会导致光束闪烁和漂移。

b) 天气快速变化。海上局部天气变化剧烈,需部署多波长、多链路冗余系统。

c) 大口径接收设备。采用口径大于等于200 mm的大型望远镜,提高接收能量,增强抗衰减能力。

d) 自适应功率与调制控制。结合天气监测系统,动态调整发射功率与调制方式。

未来在海平面远距离场景中,可采用混合FSO/毫米波通信、卫星中继等方式,进一步提升链路可用度与连续性。

7 提升FSO可靠性的优化策略

针对上述设计挑战,可以采用以下方法优化FSO系统的稳定性和适用性。

7.1 构建混合通信网络^[11]

结合FSO、毫米波通信和光纤网络等技术,形成具备自动切换能力的混合通信架构。在FSO受天气影响不可用时,系统可快速切换至备用传输链路,确保通信不中断。图3所示为FSO与微波混合传输模式。

7.2 自适应功率控制

通过实时监测环境状况,动态调整激光发射功率,以适应不同天气条件,减少信号衰减带来的影响。例如,在雾霾较重或降水较大的情况下,系统可自动增加激光功率,以弥补信号损失。

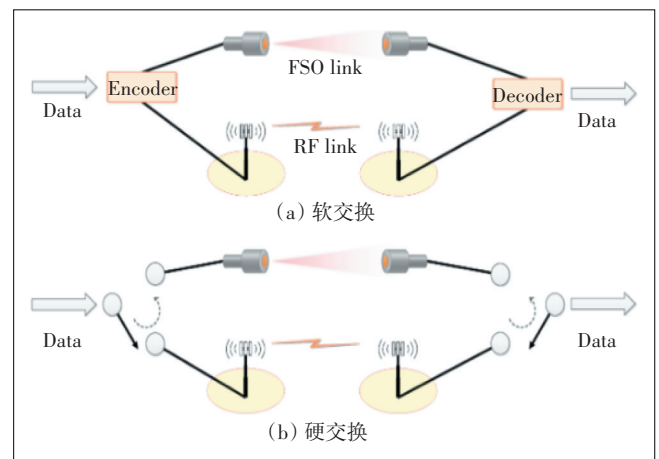


图3 FSO与微波混合模式

7.3 多波长技术

采用多波长光通信技术^[12-13],利用不同波长的信号进行冗余传输,不同波长在大气条件下的衰减程度不同,能够有效降低恶劣天气对通信质量的影响,从而提升系统的可靠性。

8 FSO 验证分析

8.1 站址选择

本次试验在东南亚某国选取2个站点进行FSO设备部署,其中1个为楼顶基站,另1个为地面基站,站点相距2.1 km。

8.2 关键性能指标验证

试验通过RFC 2544标准测试了FSO链路的吞吐量、延迟、抖动和误码率(BER)等关键性能指标。测试结果如表5所示。

表5 关键性能指标测试结果

帧长度/B	吞吐量/(Mbit/s)	时延/ μ s	抖动/ μ s	误码率
64	9 799.8	19.16	0.01	3.65×10^{-9}
512	9 760.8	19.56	0.01	3.65×10^{-9}
1 512	9 799.9	20.35	0.01	3.65×10^{-9}
9 600	9 789.9	26.83	0.01	3.65×10^{-9}

a) 吞吐量。在不同帧长度(64 B、512 B、1 512 B、9 600 B)下,FSO链路的吞吐量均接近10 Gbit/s,表现出极高的带宽能力。

b) 延迟。FSO链路的往返延迟(RTD)在19.16~26.83 μ s,表现出极低的延迟特性。

c) 抖动。FSO链路的抖动非常小,最大平均抖动仅为0.01 μ s,适合对延迟敏感的应用场景。

d) 误码率(BER)。FSO链路的误码率为 3.65×10^{-9} ,远低于 10^{-6} 的标准要求,表现出极高的传输可靠性。

为验证FSO系统在环境变化下的链路稳定性,本研究记录了典型时间段内FSO链路吞吐量、延迟及误码率的连续变化曲线。

图4所示为FSO系统在突发天气扰动下的链路恢复性能曲线。从图4可以看出,在小雨或轻雾引起的链路性能波动后,系统能在2 min内快速恢复至接近9.8 Gbit/s的稳定吞吐量,同时误码率从 1×10^{-4} 快速下降并稳定在 3.65×10^{-9} 。该曲线进一步验证了系统具备良好的动态自适应与收敛稳定能力,适用于对通信可靠性要求极高的5G场景。

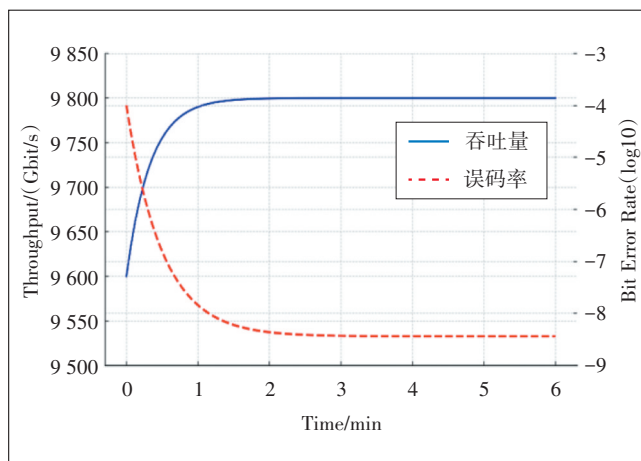


图4 FSO链路吞吐量误码率恢复曲线

8.3 不同环境性能测试

在不同日期和天气条件下,FSO系统有不同的性能表现(见表6)。

表6 不同日期和天气条件下的接收信号电平(RSL)及可用度

日期	天气状况	RSL/dBm	可用度/%
2024/11/21—22	晴天	-15~-16	99.948 8
2024/11/23—24	晴天	-15~-16	99.925 8
2024/11/25—26	晴天	-15~-16	99.954 2
2024/11/27—28	晴天	-15~-16	99.927 2
2024/11/29—30	晴天	-15~-16	99.991 0
2024/12/01—02	晴天	-15~-21	99.999 3
2024/12/02—03	雨天	-37~-38	99.036 8
2024/12/04—05	晴天	-15~-16	99.962 6
2024/12/06—07	多云	-15~-27	99.944 8
2024/12/08—10	局部多云、小雨	-15~-18	99.972 9
2024/12/11—12	晴天	-15~-18	99.977 3
2024/12/13—14	晴天	-15~-17	99.973 6
2024/12/15—17	晴天	-15~-17	99.960 8

FSO链路在晴天及部分多云天气下可用性超99.9%,但大雨时接收功率降至-38 dBm,可用性降至约99%。FSO系统的自动功率控制(APC)功能可根据天气调整发射功率,确保恶劣天气下链路稳定,并验证了试验与链路预算的结果基本吻合,达到试验的目的。

在FSO试验期间,观察到平均延迟波动的最小改善为3~5 ms。这突出了FSO系统在延迟敏感应用中的潜在性能。

8.4 网络性能影响分析

试验验证了FSO链路对4G和5G网络性能的影响。

响。在30天的稳定性监控中,FSO链路对4G和5G的关键性能指标(KPI)没有产生显著影响,网络保持了稳定的性能。试验结果表明:

a) 对于4G网络,试验前后基站的上行流量和下行流量基本保持一致;掉线率和RRC连接成功率未见明显变化;语音掉线率和小区内切换成功率也保持稳定。

b) 对于5G网络,用户平均上下行速率在试验前后保持稳定;RRC连接建立成功率和无线接入成功率未受到影响;基站切换成功率及5G-4G跨制式切换成功率同样保持正常水平。

因此,在30天的稳定性监控中,FSO链路对4G和5G的关键性能指标没有产生显著影响,网络性能表现稳定。

9 结束语

FSO技术具备高带宽、低时延、灵活部署及免频谱许可等核心优势,在5G网络及未来通信系统(6G)中将发挥重要作用^[3]。本文通过理论分析、工程设计和试验验证,探讨了FSO的技术原理、关键突破及其在复杂环境中的应用,得出以下结论。

a) 技术突破。在2.1 km链路测试中,FSO系统实现10 Gbit/s的传输速率,验证了其高可靠性,并通过波束跟踪等技术提升抗干扰能力,使复杂气象条件下的可用度超99.9%。

b) 工程设计与验证。试验表明,FSO系统在晴天及轻雾条件下稳定运行,年可用度达99.74%,采用自适应功率控制(APC)及信号优化后,在强天气扰动下仍保持稳定,并可拓展至卫星通信及其他网络。

c) 未来发展方向。恶劣天气(如雾、雨)仍是FSO面临的挑战,可借助AI自适应调制、MIMO光束及智能波束控制等技术提升适应性,并推动FSO与卫星、毫米波等融合,扩展全球通信覆盖。

综上,FSO技术凭借其创新性和独特优势,将在未来通信网络中发挥关键作用,成为无线光通信的重要支撑技术。随着6G网络的发展,通信系统将逐步演进为空地一体化三维立体组网架构。FSO系统在未来不仅需要适应地面链路,还要与无人机、低轨卫星、浮空平台(HAPs)等节点动态协同。针对复杂移动环境中链路的快速变化,未来FSO技术可结合机器学习、智能波束控制、自适应调制等手段,实现更快速的链路建立与收敛,保障超大带宽、超低延迟的连接需

求,为6G网络提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] LIVERMAN S, BIALEK H, NATARAJAN A, et al. VCSEL array-based gigabit free-space optical Femtocell communication [J/OL]. *Journal of Lightwave Technology*; 1-9 [2025-09-29]. <https://photonics.oregonstate.edu/sites/photonics.oregonstate.edu/files/publications/2020/08930033.pdf>.
- [2] ZHAO X S, ZHU L, FU S N, et al. Dual-band accelerating beams enabled full duplex free-space optical interconnection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(1): 1-7.
- [3] WANG Z, LIU D. Free space optical communication in 6G networks: a comprehensive survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(4): 2529-2566.
- [4] AHMED N. Recent advances in Free-Space optical communications for 5G and beyond networks: a survey [J]. *IEEE access*, 2023, 11: 4876-4902.
- [5] PARK J, CHOI S. Machine learning-aided atmospheric channel modeling for FSO links in 5G systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(1): 90-96.
- [6] 张杰. FSO在低空网络中的应用探究 [EB/OL]. [2025-09-29]. <https://www.doc88.com/p-21843820162619.html>.
- [7] ITU. Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links: P. 1817 [R/OL]. [2025-09-29]. <https://www.itu.int/rec/r-rec-p.1817/en>.
- [8] YANG C, LIU Z, ZHAO F. Deep learning aided turbulence compensation for FSO systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(12): 10458-10469.
- [9] WANG X. Quantum key distribution with free-space optical communication [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 1-12.
- [10] 范景祥. FSO基本原理及工程设计链路分析 [EB/OL]. [2025-09-29]. <https://www.doc88.com/p-9911678735943.html>.
- [11] ZHANG Y, LIU D. Machine learning for atmospheric turbulence compensation in FSO systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(8): 5123-5135.
- [12] TSAI W S, LIN C T. Hybrid FSO/RF communication systems: a review [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 137833-137847.
- [13] ZHANG W, HRANILOVIC S, SHI C. Soft-switching hybrid FSO/RF links using short-length raptor codes: design and implementation [J]. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2009, 27(9): 1698-1708.

作者简介:

窦中兆, 毕业于华南理工大学, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为无线通信关键技术、4G/5G自优化技术、自动驾驶网络等; 周宏, 毕业于华南师范大学, 工程师, 学士, 主要从事移动网络策略、规划和建设工作; 曾云光, 毕业于湖北工业大学, 工程师, 主要从事移动网络咨询设计研究工作。