

气象数据融合的星地激光链路多物理场损耗分析

马宁,周泓宇,杨盛亿,黎相成,张振荣*

(广西大学 计算机与电子信息学院,南宁 530004)

摘要:为了研究实际气象参数对星地激光通信系统通信性能的影响,构建基于风速-能见度气象参数的星地激光通信系统接收功率损耗模型。利用 Hufnagel-Valley 湍流模型与 Von Karman 功率谱,结合快速傅里叶变换法生成大气湍流相位屏,并引入米氏散射理论量化雾衰减效应,仿真分析了不同气象窗口下接收功率的变化规律及光斑分布特征。仿真结果表明:湍流强度与光斑分散程度、激光能量衰减及接收功率损耗呈正相关;在轻雾环境下接收功率相对稳定,在湍流影响下接收功率波动显著增加;在浓雾和湍流共同作用的复合环境下,系统的接收功率可降至-85.64 dBm,且在风速达到或超过 15 m/s 的条件下,通信中断的概率为 38.33%。

关键词:自由空间光通信;气象参数;湍流相位屏;大气湍流;大气衰减;接收功率

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0097-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.016

Analysis of multi-physical field loss in satellite-to-ground laser links with integrated meteorological data

MA Ning, ZHOU Hongyu, YANG Shengyi, LI Xiangcheng, ZHANG Zhenrong*

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To investigate the impact of actual meteorological parameters on the communication performance of satellite-to-ground laser communication systems, a model for atmospheric channel received power loss based on wind speed and visibility parameters was constructed. The Hufnagel-Valley turbulence model and the Von Karman power spectrum were employed, combined with the fast Fourier transform method to generate atmospheric turbulence phase screens. Mie scattering theory was introduced to quantify the fog attenuation effect. Simulation results indicated that turbulence intensity is positively correlated with spot dispersion, laser energy attenuation, and received power loss. In light fog conditions, the received power remained relatively stable, whereas under turbulence influence, the fluctuation of received power significantly increased. In a combined environment of heavy fog and turbulence, the system's received power could drop to -85.64 dBm, and the probability of communication interruption reached 38.33% when wind speeds were at or exceeded 15 m/s.

Key words: free space optical communication, meteorological parameters, turbulent phase screen, atmospheric turbulence, atmospheric attenuation, received power

0 引言

自由空间光通信凭借其大容量、轻量化、高保密性以及强抗电磁干扰能力等优势^[1],可有效解决“最后

一公里”的通信难题。然而,在星地激光通信下行链路中,激光通信对信道环境的要求极为苛刻,作为高价值数据地面回传的重要手段,星地激光链路在传输信号时极易受到大气环境的干扰^[2]。在星地激光通信系统的性能研究中,易湘^[3]采用3层高度谱模型描述近地处大气边界层中的 Kolmogorov 湍流和中高层大气中的非 Kolmogorov 湍流,分析了弱湍流条件下准直高斯光束在接收机处的光强闪烁,考虑了光束漂移对光强闪烁的贡献。姜义君^[4]研究了大气湍流引起的光束漂移效应对上行星地激光通信系统的影响,基于高斯光束上行传输的光束漂移和光强闪烁模型,给出了这2种效应共同作用下接收光强概率密度的表达式。

收稿日期:2025-07-21。

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科AB23075155)资助;国家自然科学基金项目(62361003)资助。

作者简介:马宁(2000—),女,黑龙江黑河人,硕士研究生,现就读于广西大学计算机与电子信息学院通信工程专业,主要从事自由空间光通信、星地激光通信链路预算方面的研究,并针对自由空间光通信大气信道传输链路损耗进行建模及仿真验证。

*通信作者:张振荣(1976—),男,博士,教授,主要研究方向为通信网络及光纤传感技术。



Zhang Xiaoyu 等人^[5]研究了大气湍流和气象条件对星地激光通信系统误码率的影响。但以上研究只分析了单一气象参数或单一物理场对星地下行链路的传输损耗影响。因此,本文嵌入2种真实的气象参数(风速和能见度)来准确计算接收功率的损耗,通过对星地激光通信系统接收功率的建模,模拟不同强度的大气湍流相位屏,分析不同能见度气象窗口下通信系统性能以及大气湍流对接收光斑的影响情况。

1 考虑气象参数的多物理场接收功率衰减模型

大气环境对星地激光通信的影响可表现为接收功率的衰减,从而降低通信系统性能。本文通过建立激光通信系统接收功率模型,分析接收功率的衰减情况,从而准确评估星地激光通信链路中大气信道的衰减特性,其表达式为

$$P_r = P_t + G_r + G_t - L \quad (1)$$

式中: P_r 为接收功率, P_t 为发射功率, G_r 为接收天线增益, G_t 为发射天线增益,在不同的通信系统中, P_t 、 G_r 、 G_t 的参数设置不同。 L 为自由空间光通信的大气信道总传输损耗。

结合实际测量数据,雾、大气湍流等引起的衰减显著大于大气吸收和散射损耗,且其变化幅度对系统性能的影响更为显著^[6]。因此,本文建立能见度-雾衰减-接收功率的衰减模型,并通过风速表征湍流影响的耦合作用。同时,考虑到工程可实施性,本文选择能见度和风速作为可获取的气象参数,与ITU-R标准形成互补,从而更贴近实际应用需求。总传输损耗 L 由式(2)计算。

$$L = L_{\text{freespace}} + L_{\text{fog}} + L_{\text{turb}} + L_{\text{point}} \quad (2)$$

式中: $L_{\text{freespace}}$ 表示自由空间传输损耗, L_{fog} 表示雾引起的衰减, L_{turb} 表示大气湍流衰减, L_{point} 表示收发机指向误差。

1.1 基本传输损耗模型

1.1.1 自由空间传输损耗 $L_{\text{freespace}}$

无论在何种气象环境下,激光通信的自由空间传输损耗都存在。在本文的仿真模型中,星地传输距离远远大于信号波长的量级,因此其衰减表达式为

$$L_{\text{freespace}} = 20 \log \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right) \quad (3)$$

式中: D 为传输距离, λ 为激光波长。

1.1.2 雾引起的衰减 L_{fog}

大气中各种大小的气溶胶粒子和大气分子会对激光光波产生大气散射效应。这种散射效应主要由

大气中的微粒引起,其粒径范围从纳米级的分子到微米级的气溶胶粒子不等。在这些微粒中,雾作为一种特殊的气溶胶现象,对激光传输的影响尤为显著。雾是指近地面层空气中悬浮的大量水滴或冰晶微粒的乳白色集合体,并使水平能见度降至1 000 m以下的天气现象^[7]。由于雾中水滴或冰晶的粒径与激光波长相近,因此雾引起的散射效应完全适用于米氏散射模型,米氏散射系数 γ 和 q 的一般模型分别为

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (4)$$

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.585V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V 表示能见度,是衡量雾浓度的参数。能见度在1 km以上时为轻雾、在200~500 m范围内为大雾、在50~200 m范围内为浓雾。

1.1.3 大气湍流衰减 L_{turb}

光强起伏现象是大气湍流导致的最常见且最明显的光传输现象之一,可解释为大气折射率的随机起伏导致了传输激光的振幅变化,从而形成散射强度起伏的现象。为量化风速对衰减的影响,基于Rytov理论可建立湍流衰减模型为

$$L_{\text{turb}} = 10 \lg(1 + 2.5\sigma_R^{0.6}) \quad (6)$$

式中: σ_R 为Rytov方差,表征湍流引起的闪烁强度,其表达式为

$$\sigma_R = aC_n^2 k^{7/6} D^{11/6} \quad (7)$$

式中: C_n^2 为折射率结构常数, k 为波数; a 为常数,球面波时取值为0.496,平面波时取值为1.23。大气湍流折射率结构常数与风速的经验关系模型^[8]为

$$C_n^2(h) = C_{n0}^2 \exp\left(-\frac{v}{10}\right) + \varepsilon v^2 \quad (8)$$

式中: C_{n0}^2 为背景湍流常数,通常取值为 $5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; v 为动态风速; ε 为湍流增强系数,通常取值为 $5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} \text{ s}$ 。

1.1.4 收发机指向误差 L_{point}

在星地激光通信系统中,收发机间的指向误差是影响链路稳定性的关键因素之一。该误差主要由卫星平台姿态抖动、热变形效应及地面站跟踪精度不足引起,表现为接收端光斑中心与探测器光敏面的相对偏移。为量化指向误差对接收功率的影响,可采用基于几何光学的统计模型进行描述,其表达式为

$$L_{\text{point}} = -10 \lg \left(\frac{1}{1 + 2\sigma_p^2/w_{\text{eff}}^2} \right) \quad (9)$$

式中: σ_p 为指向误差的标准差, w_{eff} 为等效光束半径,典型值为0.01~0.1 m,计算式为

$$w_{eff} = w \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda D}{\pi w^2}\right)^2} \quad (10)$$

式中: w 为光束的束腰半径。

2 接收光强分布

为了简化分析,本文采用相位屏来模拟大气湍流对激光光强的影响。将完整的传输路径分成一段又一段的传输短路径,将每一段路径对光束的作用等效成一个薄层相位屏对光束相位的作用。当高斯光束通过相位屏时,其波前将受到相位屏引入的随机相位扰动的调制。这种相位扰动可以分解为不同空间频率的分量,不同空间频率的分量对光束的影响程度不同。采用多层相位屏法模拟激光在连续湍流介质中的传输,其光场表达式^[9]为

$$u(r, z_i) = \text{IFFT}\{\text{FFT}(u(r, z_{i-1}))\exp(iS(r, z_{i-1}))\} \times \exp[-i(K_x^2/2k)\Delta z - i(K_y^2/2k)\Delta z] \quad (11)$$

式中: $S(r, z_{i-1})$ 为激光传输过程中第*i*个相位屏引起的相位扰动, $u(r, z_i)$ 是 z_i 处的光场, K_x, K_y 是空间波数。本文采用基于傅里叶变换的功率谱反演法^[10-15]模拟湍流相位屏,利用傅里叶变换的性质,将功率谱转换为空间域的相位分布,大气扰动的随机相位^[16]为

$$\phi(x, y) = C \iint_{-\infty}^{\infty} a(K_x, K_y) \sqrt{\Phi_n(k)} \exp(ir, K) dK \quad (12)$$

式中: $a(K_x, K_y)$ 为复高斯随机数矩阵, $\Phi_n(k)$ 为折射率功率谱,本文采用Vor Karman功率谱,其表达式为

$$\Phi_n(k) \approx \frac{0.033C_n^2}{(k^2 + k_0^2)^{6/11}} \exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right) \quad (13)$$

式中:外尺度空间频率 $k_0 \approx 2\pi/L_0$,内尺度空间频率 $k_m = 5.92/l_0$; L_0 为湍流的外尺度,在对流层的高空可达数千千米。 l_0 为湍流的内尺度,一般在毫米到厘米量级。

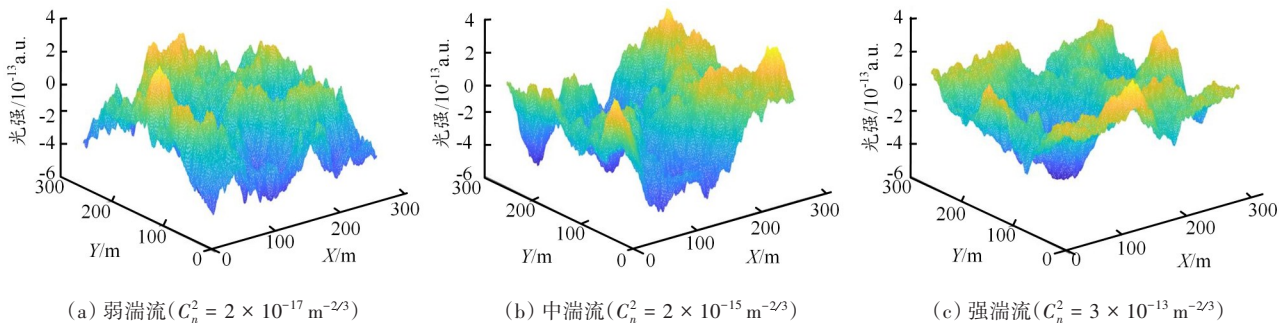


图1 不同强度湍流相位屏的三维分布

对于斜向传输,Hufnagel-Valley模型中折射率的大气结构常数表示如下:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} \left(\frac{W}{27}\right)^2 h^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (14)$$

式中: h 为海拔高度,单位是m; A 为近地面湍流强度常数, $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; W 是横向风速的均方值(通常为21 m/s)。Davis J I^[17]基于折射率结构常数,提出了一种将大气湍流划分为3种不同强度类别的方法: $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17}$ 时为弱湍流, $6.4 \times 10^{-17} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13}$ 时为中等强度湍流, $C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13}$ 时为强湍流。根据Davis湍流划分理论和表1参数生成的相位屏三维分布如图1所示。可以看出,随着折射率结构常数增大(湍流强度增强),相位屏的相位起伏更剧烈、空间分布更复杂,对应激光传输中的光强闪烁、光束飘移等效效应更显著。

3 仿真结果及分析

为了深入分析实际大气条件下多种物理因素对卫星激光通信系统接收功率的影响,本文采用美国国

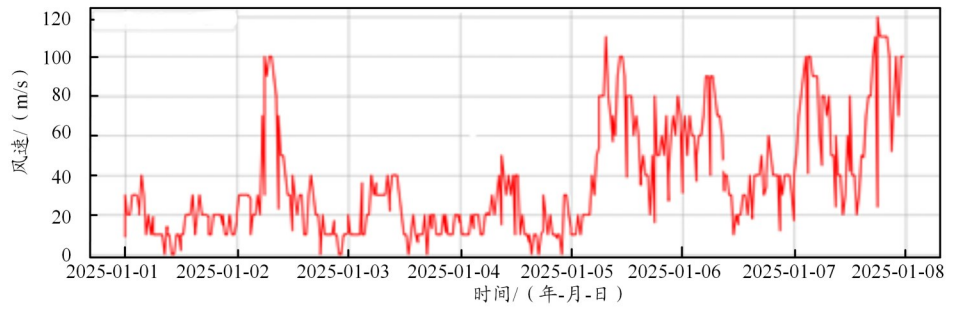
表1 相位屏仿真参数表

参数名称	参数值
大气传输距离 D/km	1 000
相位屏间距 d/m	200
束腰半径 w/m	0.02
湍流结构常数(弱) $C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	2×10^{-17}
湍流结构常数(中) $C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	2×10^{-15}
湍流结构常数(强) $C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	3×10^{-13}
湍流内尺度 l_0/m	0.01
湍流外尺度 L_0/m	50

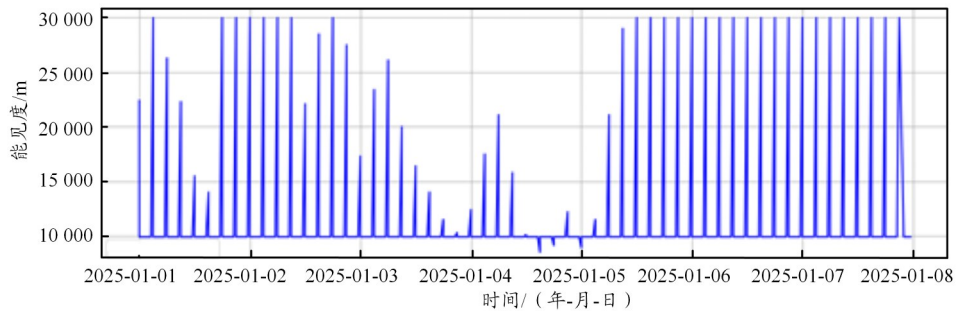
马宁,周泓宇,杨盛亿,等:气象数据融合的星地激光链路多物理场损耗分析

家海洋和大气管理局发布的北京首都机场站一周内风速和能见度的实测数据(如图2所示)进行模型仿真计算。图3为根据真实气象参数产生的一周内星地激光通信系统接收功率的变化情况。可以看出,仅轻雾的影响下接收功率波动较小,最低达到 -66.13 dBm;在仅受大气湍流影响的情况下,接收功率的波动显著增加,整体水平较低,最低可降至 -80.15 dBm,这表明大气湍流对激光通信系统的性能有着显著的负面影响;在浓雾和湍流共同作用的复合环境下(在能见度较高时,系统接收功率的衰减主要由风速所表征的湍流效应主导),接收功率的波动达到最大,其可降至 -85.64 dBm。

图2中的大多数气象条件处于轻雾状态,能见度普遍较高。为了深入探究能见度对接收功率损耗的影响,本文采用米氏散射模型,随机生成能见度参数,用以模拟不同浓度雾况对接收功率的变化情况,通过这种方法能更精确地描述和分析雾浓度对卫星激光通信系统接收功率损耗的影响。接收功率衰减模型参数设置如表2所示。仿真得到通信系统在轻雾、大雾与浓雾时接收功率变化情况如图4所示。可以看出,在轻雾条件下的接收功率表现出一定的波动,但波动较小,整体上仍然保持较高水平,最低时接近 -33 dBm;大雾条件下的接收功率波动较大,且数值较低,最低时接近 -47.5 dBm,这表明在大雾条件下,信号的接收功率受到了显著影响,出现了较大的衰减和不稳定;浓雾条件下的接收功率波动非常大,且数值显著降低,最低时接近 -110 dBm,信号的接收质量受到了极大的影响,出现了严重的衰减和不稳定。由此可知,星地激光通信适宜工作的气象环境为晴朗无雾或轻雾环境。



(a) 风速实测数据



(b) 能见度实测数据

图2 一周内风速和能见度的实测数据

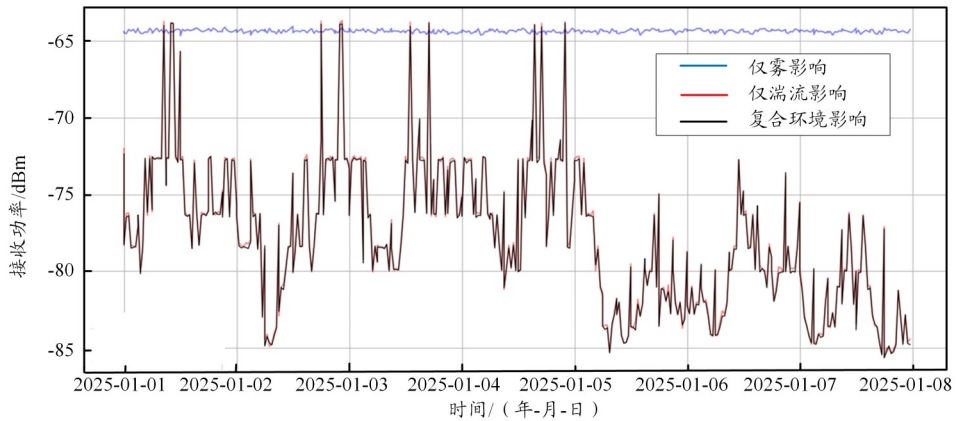


图3 真实气象参数影响下,星地激光通信系统接收功率的变化情况

表2 接收功率模型参数表

参数名称	参数值
波长 λ /nm	1 550
发射功率 P_t /dBm	15.4
发射天线增益 G_t /dBi	83.4
接收天线增益 G_r /dBi	129.7
均方根风速 V_{rms} /m/s	21
雾厚 d_{fog} /m	10~1 000
雾的能见度 V /km	0.05~10

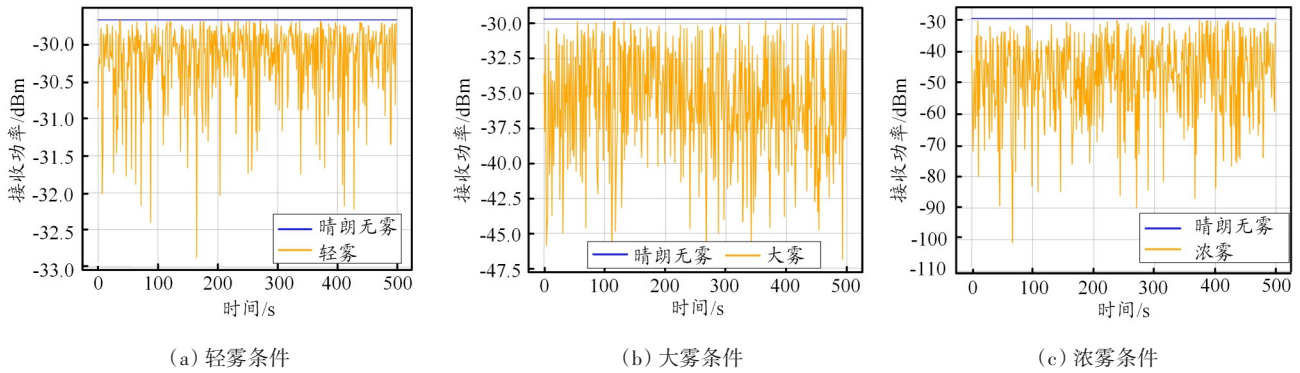


图4 不同气象参数下接收功率的变化情况

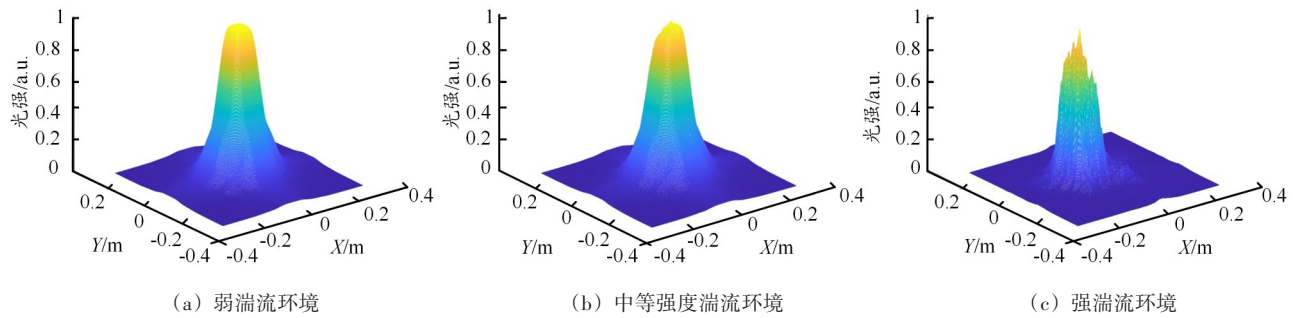


图5 不同强度湍流环境下,接收端点光源的光场及光斑分布

不同湍流环境下接收端点光源的光场及光斑分布如图5所示。可以看出,弱湍流($C_n^2 = 2 \times 10^{-17} \text{ m}^{-23}$)情况下光斑的光强非常集中,中心亮度强,光斑形状均匀,基本没有分裂现象;中等强度湍流($C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-23}$)情况下,光斑光强比较集中,中心亮度较强,光斑形状比较均匀;强湍流($C_n^2 = 3 \times 10^{-13} \text{ m}^{-23}$)情况下,光斑的光强分散,光斑中心亮度减弱,光斑分裂现象特别严重。由此可知,湍流强度越强,光斑越发散,激光能量衰减越大。

本文采用高增益的雪崩光电二极管(APD)探测器衡量高风速对通信系统中断概率的影响,其灵敏度下限为 -72 dBm ,根据链路预算,当接收功率低于此阈值时判定为通信中断,得到的变化情况如图6所示。可

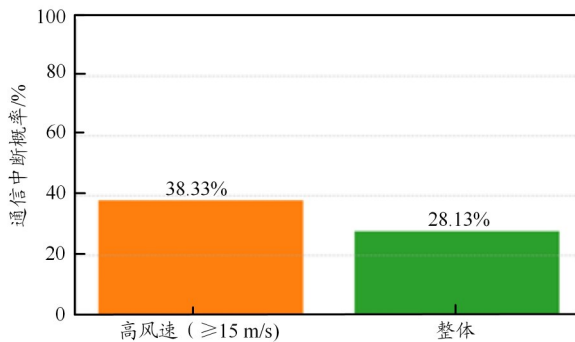


图6 不同气象参数下接收功率的变化情况

以看出,在风速达到或超过 15 m/s 的条件下,通信中断的概率显著增加至 38.33% ,相比整体通信中断概率高约 10.2% 。这表明高风速对通信系统稳定性有较大影响,会导致信号传输不稳定、接收功率下降等问题,从而引发通信中断。因此,对于不同接收功率灵敏度的系统,应尽量选取合适的风速气象窗口进行通信。

4 结束语

本文针对星地激光通信链路传输损耗难题,构建实测气象参数融合的星地激光通信系统多物理场接收光功率模型。通过整合米氏散射理论、Kolmogorov湍流理论等,综合考量雾衰减效应、自由空间传输损耗、指向误差及闪烁衰减对接收功率的影响,利用北京首都机场实测数据,揭示不同气象条件下接收功率的变化规律: 1550 nm 波长、 15.4 dBm 发射功率时,晴朗场景接收功率稳定;轻雾下接收功率波动有限,可满足常规通信需求;大雾环境需提升发射功率或采用前向纠错技术保障通信;浓雾天气则完全丧失有效通信能力;光斑发散度与湍流强度正相关,湍流会加剧激光能量衰减。研究成果明确了气象参数对星地激光通信系统性能的关键影响,为星地激光通信系统“双阈值”气象窗口选择提供了参考,为通信系统气象

马宁,周泓宇,杨盛亿,等:气象数据融合的星地激光链路多物理场损耗分析

窗口规划与性能优化提供理论依据,有效解决星地激光通信受气象环境制约的理论与实际问题。

参考文献

- [1] SONG S, LIU Y, XU T, et al. Channel prediction for intelligent FSO transmission system[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27882–27899.
- [2] Ricklin J C, Hammel S M, Eataon F D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication[J]. *Optical Fiber Communication*, 2006, 3(2): 111–158.
- [3] 易湘. 大气激光通信中光强闪烁及其抑制技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [4] 姜义君. 星地激光通信链路中大气湍流影响的理论和实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] Zhang Xiaoyu, Cui Sheng, Liu Deming, et al. Impact of atmospheric turbulence and weather conditions on the performance of satellite-to-ground optical communication system based on multiaperture coherent receivers[J]. *ical Engineering*, 2019, 58(5): 056110.
- [6] ITU-R P.676-13—2022 Attenuation by atmospheric gases and related effects[S].
- [7] GB/T 27964-2011 雾的预报等级[S].
- [8] Quatresooz F, Oestges C. C_n^2 Modeling for Free-Space Optical Communications: A Review[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 21279–21305.
- [9] RAO Ruizhong. *Modern atmospheric optics*[M]. Beijing: Science Press, 2012: 481–505.
- [10] Martin J M, Stanley M F. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(11): 2111–2126.
- [11] Coles W A, Filic E P, Frehlich R G, et al. Simulation of wave propagation in three-dimensional random media[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(12): 2089–2101.
- [12] Frehlich R. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(3): 393–397.
- [13] Xiang Jinsong. High-frequency error compensation method for the fast fourier transform-based turbulent phase screen[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 5–9.
- [14] Zhao Z, Chen M, Liu X, et al. Simulation and experiment of subharmonic method for low-frequency compensation in atmospheric turbulence phase screen[C]//Sixth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application, Beijing, China. Bellingham: SPIE, 2020: 114553Z.
- [15] Xiang Jingsong. Fast and accurate simulation of the turbulent phase screen using fast fourier transform[J]. *Optical Engineering*, 2014, 3(1): 016110.
- [16] Johansson E M. Simulation of stellar speckle imaging[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1994, 2200 (Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II): 372–383.
- [17] Davis J I. Consideration of atmospheric turbulence in laser systems design[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(1): 139–147.