

引用本文:石卓灵,蒋大钢,牛梦晨,等.大气光通信链路综合仿真方法研究[J].光通信技术,2026,50(1):33-41.

大气光通信链路综合仿真方法研究

石卓灵¹,蒋大钢^{1,2,3*},牛梦晨¹,卜煜霖¹

(1.电子科技大学 航空航天学院,成都 611731;2.自适应光学全国重点实验室,成都 610209;

3.飞行器集群智能感知与协同控制四川省重点实验室,成都 611731)

摘要:为解决大气光通信链路性能仿真中接收过程建模不完善的问题,提出了一种大气光通信链路综合仿真方法。该方法以相位屏法模拟大气湍流与发射端跟踪误差对光束传输的影响,并进一步引入接收透镜聚焦模型与接收端跟踪误差,实现了从发射到探测器接收功率的全链路闭环仿真。仿真结果表明,基于探测器接收功率的性能评估结果与现有理论模型存在明显偏差,尤其在接收端跟踪误差作用下,焦平面功率起伏分布与理论预测显著不符。该综合仿真方法可为大气光通信链路的精确设计与性能理论验证提供有效支撑。

关键词:大气光通信;大气湍流;大气衰减;跟踪误差;相位屏仿真

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0033-09

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.006

Comprehensive simulation method research for atmospheric optical communication link

SHI Zhuoling¹, JIANG Dagang^{1,2,3*}, NIU Mengchen¹, BU Yulin¹

(1. School of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu 610209, China;

3. Aircraft Swarm Intelligent Sensing and Cooperative Control Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China)

Abstract: To address the issue of incomplete modeling in the receiving process of atmospheric optical communication link performance simulations, a comprehensive simulation method for atmospheric optical communication links is proposed. This method employs the phase screen approach to simulate the effects of atmospheric turbulence and transmitter tracking errors on beam propagation. It further incorporates a receiving lens focusing model and receiver tracking errors, thereby achieving a closed-loop simulation of the entire link from transmission to detector received power. Simulation results show that the performance evaluation based on detector received power deviates significantly from existing theoretical models, particularly under the influence of receiver tracking errors, where the fluctuation distribution of focal plane power markedly differs from theoretical predictions. This comprehensive simulation method provides effective support for the precise design and theoretical validation of atmospheric optical communication links.

Key words: atmospheric optical communication, atmospheric turbulence, atmospheric attenuation, tracking error, phase screen simulation

收稿日期:2025-02-07。

基金项目:中央高校业务费(ZYCX2024K009)资助。

作者简介:石卓灵(1999—),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为大气光通信链路的仿真模拟和大气光通信链路下的平均焦斑理论推导及通信性能分析,曾获全国大学生数学建模竞赛省一等奖、美国大学生数学建模竞赛二等奖等奖项。

*通信作者:蒋大钢(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为激光通信、光电探测和光电信息处理。



0 引言

大气光通信传输速率高、抗电磁干扰能力强、无需频谱许可,不仅可在复杂电磁环境下实现海量数据高速传输,还可在应急通信和边远地区通信场景下快速建立链路。因此,大气光通信被视为是下一代通信技术发展的关键方向之一^[1-3]。

大气光通信系统的性能主要受制于大气湍流、大气衰减以及收发端跟踪误差等复合效应^[4-7]。其物理过程明确:发射的高斯光束经大气传输后,在接收平

石卓灵,蒋大钢,牛梦晨,等:大气光通信链路综合仿真方法研究

面形成强度和相位随机起伏的散斑场^[4-6],该散斑场再经接收光学系统聚焦,最终在焦平面上形成强度与重心随机变化的光斑,导致通信探测器接收功率发生剧烈起伏,进而恶化系统误码率^[4,7-10]。然而,当前研究存在显著的不平衡。在理论层面,大量工作聚焦于从发射到接收平面散斑的前向传输过程,并基于对数正态、Gamma-Gamma等模型建立了误码率闭合表达式^[10-14]。尽管近年有研究尝试在Malaga通用分布模型中纳入收发跟踪误差^[14],但由于未对接收光学系统(从接收面散斑到焦平面光斑)进行严格建模,其表达式的准确性与普适性仍存疑。在仿真层面,作为验证理论的重要手段,相位屏法^[18-21,25]与Zernike多项式法^[15-17,22-24]虽能有效模拟前向传输中的光场畸变,但蒙特卡洛方法^[26-29]仅能进行统计验证,均缺乏对“接收-聚焦-探测”这一后端过程的完整物理仿真。

在跟踪误差的仿真建模方面,已有研究基于相位屏法成功实现了对发射端跟踪误差的仿真,并将其应用于各类光束在大气信道中的传输特性分析^[21,30-32]。然而,现有的大气光通信性能仿真体系,普遍未同时纳入接收过程的物理仿真与接收端跟踪误差的影响,导致仿真链路不完整,难以准确评估真实系统的性能瓶颈。因此,本文旨在建立一套完整覆盖传输过程、接收过程及收发端跟踪误差的大气光通信链路综合仿真方法。

1 大气光通信链路综合仿真方法设计

大气光通信链路综合仿真方法设计原理如图1所示。该方法分为传输模型和接收模型两大部分。其中,传输模型采用考虑发射端跟踪误差的相位屏仿真方法^[22];接收模型则是在传输模型得到的接收平面散斑基础上,进一步在接收端跟踪误差影响下,仿真接收孔径上的散斑到焦平面光斑再到通信探测器接收功率的过程。图中, z 为方向传输距离, σ_θ 为发射跟踪误差, σ_β 为接收跟踪误差, L 为传输距离, D_1 为接收

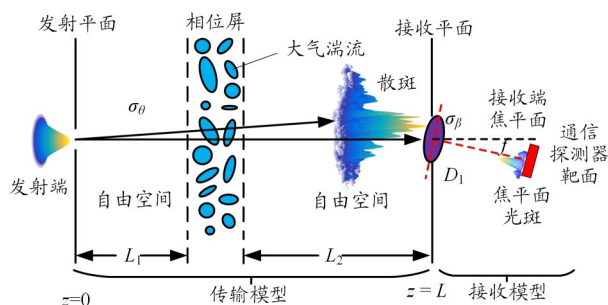


图1 大气光通信链路综合仿真方法设计原理图

孔径。

传输模型仿真主要流程如下:首先,初始化发射光场;随后,发射光场在自由空间传输 $0.36L$ 距离,此时引入相位屏对光场强度和相位进行随机扰动;扰动后的光场继续传输 $0.64L$ 距离,得到与理论模型(包括光强起伏概率密度函数与平均光强统计理论)高度吻合且仅由大气湍流调制下的接收平面散斑仿真结果;最后,根据发射端跟踪误差模型生成随机指向角,使散斑中心在接收平面内随机偏移,从而获得同时包含大气湍流与发射端跟踪误差联合调制作用的接收平面散斑。

接收模型仿真主要流程如下:首先,对接收孔径上的散斑光场进行预处理。由于相位屏仿真中引入的相位扰动可能超出 2π 范围,引起相位突变,因此需采用解绕算法^[34]恢复相位的连续性。同时,为提高仿真精度,对接收孔径上散斑光场的幅值与相位分别进行插值处理。随后,基于惠更斯-菲涅尔原理,接收孔径上散斑到焦平面光斑的聚焦过程可建模为傅里叶变换^[9]。通过对预处理后的散斑光场进行傅里叶变换,即可得到焦平面上的光斑分布。接着,接收端跟踪误差会引起接收孔径光场到达角的变化,从而导致焦平面光斑中心发生随机偏移^[14]。基于这一机理,结合接收端跟踪误差与接收透镜的焦距,即可对焦平面光斑中心的随机移动进行仿真。最后,由于通信探测器的尺寸和位置固定,焦平面光斑中心的随机移动将导致探测器接收功率产生随机起伏,进而可计算出通信误码率的动态变化。至此,实现了从光场传输到通信性能评估的全链路仿真闭环。

1.1 传输模型

发射端复高斯光束的光场表达式可写为^[4]

$$U_0 = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{W_0^2}\right) \exp\left(-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R_{z_{\text{in}}}}\right) \quad (1)$$

式中: x, y 分别为接收平面水平和垂直方向上的坐标, W_0 为发射端的光束半径; $R_{z_{\text{in}}}$ 为相前曲率半径, $R_{z_{\text{in}}} = Z_{\text{link}}\left(1 + \pi W_0^2/(\lambda Z_{\text{link}})^2\right)$, Z_{link} 为传输距离; k 表示波数($k=2\pi/\lambda$), λ 为激光波长。

假设相位屏尺寸为 D ,网格数为 N_1 ,则相位屏格距为 $\Delta x = \Delta y = D/N_1$,坐标区间为 $-D/2 \sim D/2$ 。发射高斯光束参数不变,通过相位屏进行了 j 次仿真,得到接收平面第 j 个光场的表达式为^[21]

$$U'_j(x, y, L) = F^{-1}\left\{F(U_{ij}(x, y, 0.36L)) \times H_2\right\} \times \exp(-\alpha'L) \quad (2)$$

式中: F 和 F^{-1} 分别为傅里叶变换和逆变换, α' 为大气衰减系数; $U_{ij}(x, y, 0.36L)$ 表示高斯光束传输 $0.36L$ 至相位屏后的光场, $U_{ij}(x, y, 0.36L) = U_1(x, y, 0.36L) \times \exp[i\varphi_j(x, y)]$; $\varphi_j(x, y)$ 为第 j 个相位屏引起的相位扰动,而 $U_1(x, y, 0.36L) = F^{-1}\{F(U_0(x, y, L)) \times H_1\}$; 其中, H_1 表示激光从发射端到 $0.36L$ 的自由空间衍射, $H_1 = \exp[-i0.36L(k_x^2 + k_y^2)/2k]$; H_2 为激光从 $0.36L$ 处到接收平面的自由空间衍射, $H_2 = \exp[-i0.64L \exp(k_x^2 + k_y^2)/2k]$; $\exp(\cdot)$ 是指数函数。

发射端跟踪误差会引起接收平面散斑中心的随机移动,该随机移动可由随机误差角乘以距离表示。发射端跟踪产生的随机误差角通常可认为是水平和垂直2个方位上的随机误差角 θ_x 和 θ_y 共同作用生成。其中, θ_x 和 θ_y 都服从均值为0、方差为 σ_θ^2 的高斯型分布,即 $f(\theta_x) = \exp(-\theta_x^2/2\sigma_\theta^2)/\sqrt{2\pi}\sigma_\theta$, $f(\theta_y) = \exp(-\theta_y^2/2\sigma_\theta^2)/\sqrt{2\pi}\sigma_\theta$ ^[21]。同样,可以随机生成 j 组随机误差角,每个随机误差角 θ_{xj} 和 θ_{yj} 造成一次相位屏仿真的接收平面散斑中心的随机移动,即

$$U_j(x, y, L) = U'_j(x - l_{xj}, y - l_{yj}, L) \quad (3)$$

式中: l_{xj} 和 l_{yj} 分别表示第 j 个散斑光场在 x 轴和 y 轴上的位移($l_{xj} = \theta_{xj}L$, $l_{yj} = \theta_{yj}L$)。

通过上述过程便可得到在接收平面随机移动散斑序列,其中第 j 个散斑的幅值为 $|U_j(x, y, L)|$,相位为 $\phi_j(x, y, L)$ 。

1.2 接收模型

基于上述传输模型,接收模型描述如下:

1) 接收平面散斑的预处理

为了防止相位屏对散斑光场相位产生扰动导致相位突变,从而对后续过程产生影响,本文利用基于迭代的最小二乘相位解绕算法来保持相位的连续性^[34]。此外,由于接收平面散斑尺寸大于接收孔径,为了提高精度,本文采用传统的线性插值方法,对接收孔径上的光场幅值和解绕后的光场相位执行插值计算。最终,根据式(3),经过相位解绕和插值计算后的接收孔径上的散斑光场可以表示为^[33]

$$U'_{ij}(x', y', L) = |U_j(x', y', L)| \exp(i\Phi_j(x', y', L)) t(x', y') \quad (4)$$

式中: $|U_j(x', y', L)|$ 为插值后的接收平面光场的幅值, $\Phi_j(x', y', L)$ 为 $\phi_j(x, y, L)$ 经过解绕及插值后的

接收平面光场的相位, $t(x', y')$ 为截断函数。其中, x' 、 y' 分别表示插值后的水平、垂直坐标。假设相位屏尺寸为 D ,插值后网格数为 N_2 ,则接收平面的格距为 $\Delta x' = \Delta y' = D/N_2$,坐标区间为 $-D/2 \sim D/2$ 。

2) 接收孔径上的散斑的透镜聚焦变换

插值后的接收孔径上的光场 $U'_{ij}(x', y', L)$ 经过接收透镜的光学聚焦作用后,即式(4)经过透镜傅里叶变换可以得到接收焦平面上的第 j 个光场 $U'_j(x_1, y_1, L + f)$ ^[33]为

$$U'_j(x_1, y_1, L + f) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \times \exp(ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}) F\{U'_{ij}(x', y', L)\} \quad (5)$$

式中: x_1 、 y_1 分别为接收焦平面的水平和垂直方向坐标值, f 为焦距, f_x 和 f_y 为接收平面 x' 、 y' 的空间频率,和焦平面坐标 x_1 、 y_1 的关系为 $x_1 = \lambda f f_x$, $y_1 = \lambda f f_y$ 。因此,接收焦平面坐标格距为 $\Delta x_1 = \Delta y_1 = \lambda f/D$,焦平面的坐标区间为 $-\lambda f/(2\Delta x') \sim \lambda f/(2\Delta x')$ 。

对式(5)表示的接收焦平面光斑光场取模的平方,能够获得第 j 个焦平面光斑光强分布为

$$I'_j(x_1, y_1, L + f) = |U'_j(x_1, y_1, L + f)|^2 \quad (6)$$

3) 焦平面光斑加入接收端跟踪误差

接收端跟踪误差产生的随机误差角 β 通常可认为是水平和垂直2个方位上的随机误差角 β_{x_1} 和 β_{y_1} 共同作用生成的, β_{x_1} 和 β_{y_1} 都服从均值为0、方差为 σ_β^2 的高斯型分布,2个方位的随机误差角的概率密度函数(PDF)为^[13-14]

$$\begin{cases} \varphi(\beta_{x_1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\beta} \exp\left(-\frac{\beta_{x_1}^2}{2\sigma_\beta^2}\right) \\ \varphi(\beta_{y_1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\beta} \exp\left(-\frac{\beta_{y_1}^2}{2\sigma_\beta^2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)得到第 j 个随机误差角,随后计算出第 j 个焦平面光斑的随机位移 $l_{x_1j} = \beta_{x_1j}f$, $l_{y_1j} = \beta_{y_1j}f$ 。

接收端跟踪误差引起的随机误差角会导致接收到达角变化,从而导致接收焦平面光斑中心发生偏移。根据式(6)和式(7),在接收端跟踪误差影响下的第 j 个焦平面光斑光强分布 $I_j(x_1, y_1, L + f)$ 为

$$I_j(x_1, y_1, L + f) = I'_j(x_1 - l_{x_1j}, y_1 - l_{y_1j}, L + f) \quad (8)$$

4) 通信探测器功率起伏及误码率仿真

根据式(8)可以得到焦平面探测器靶面的第 j 个

石卓灵,蒋大钢,牛梦晨,等:大气光通信链路综合仿真方法研究

焦平面光斑的接收功率^[9]为

$$P_j(S) = \iint_S I_j(x_1, y_1, L+f) dx_1 dy_1 = \sum_S I_j(x_1, y_1, L+f) \Delta S \quad (9)$$

式中:接收焦平面靶面 S 中任意点 (x_1, y_1) 的光强为 $I_j(x_1, y_1, L+f)$,该点对应的网格区域微小单元格的面积 $\Delta S, \Delta S = \Delta x_1 \Delta y_1 = (\lambda f/D)^2, \Delta x_1$ 和 Δy_1 表示单元格长度。

由式(9)可以获得第 j 个焦平面探测器接收功率相应的大气光通信系统瞬时误码率 $B_j(S)$ 为

$$B_j(S) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{RP_j(S)}{2\sqrt{2}\sigma_N} \right) \quad (10)$$

式中: R 为探测器灵敏度($R = q\eta/h\nu$), q 为电子的电荷量, η 为探测器光/电转换效率, h 为普朗克常数, ν 为光波频率; σ_N 为电流噪声,以散粒噪声为主, $\sigma_N^2 = 2qRP_j(S)B_w, B_w$ 为噪声频带。

同样地,根据式(3)得到接收孔径的光强表示为 $I_j(x, y, L) = |U_j(x, y, L)|^2$,代入式(9)可以得到第 j 个接收孔径的接收功率 $P_j(D_1) = \sum_{D_1} I_j(x, y, L) \Delta D_1$, ΔD_1 表示接收孔径的微小单元格面积。将 $\sigma_N^2 = 2qRP_j(D_1)B_w$ 代入式(10)可以得到接收孔径的瞬时误码率 $B_j(D_1)$ 为^[21]

$$B_j(D_1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{RP_j(D_1)}{2\sqrt{2}\sigma_N} \right) \quad (11)$$

通过对接收孔径上的功率进行统计,可以得到功率起伏PDF仿真结果的表达式为^[21]

$$f(P(D_1)) = \frac{1}{M\Delta P(D_1)} \times \sum_{j=1}^M K_s \left[\frac{2(P(D_1) - P_j(D_1))}{\Delta P(D_1)} \right] \quad (12)$$

式中: $\Delta P(D_1)$ 表示功率之间的间隔值;公式第2项表示 $P(D_1)$ 在 $[P_j(D_1) - 0.5\Delta P(D_1), P_j(D_1) + 0.5\Delta P(D_1)]$ 内的频数,在Matlab中可以使用Kdensity实现,核函数

$$K_s(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1 \\ 0, & |u| > 1 \end{cases}$$

根据式(11)和式(12),以及平均误码率是瞬时误码率和功率起伏PDF的加权平均,则接收孔径平均误码率表示为

$$\langle B \rangle = \int_0^1 B_j(D_1) \times f(P(D_1)) d f(P(D_1)) \quad (13)$$

2 大气光通信全链路综合仿真结果

根据文献[4-8,33],设置仿真参数如下:仿真组数 $M = 10\,000$,发射光束波长 $\lambda = 850\text{ nm}$,发射端光束半径 $W_0 = 50\text{ mm}$,发射功率大小 $P_0 = 0.39\text{ mW}$,发射孔径半径 $W'_0 = 50\text{ mm}$,发射跟踪误差 $\sigma_\theta = 15\text{ }\mu\text{rad}$,传输距离 $L = 1\,000\text{ m}$,大气折射率结构常数 $C_n^2 = 2 \times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$,对应Rytov方差为0.8,接收跟踪误差 $\sigma_\beta = 15\text{ }\mu\text{rad}$,接收孔径半径 $D_1 = 15\text{ mm}$,焦距 $f = 0.3\text{ m}$,探测器靶面半径 $d = 20\text{ }\mu\text{m}$,设置相位屏大小 $D = 0.9\text{ m}$,插值前的网格数 $N_1 = 1\,500$,网格宽度 $\Delta x = 0.6\text{ mm}$ 。

根据式(3),得到第 j 个接收孔径散斑幅值的立体图和平面图分别如图2(a)和图2(b)所示。可以看出,接收孔径散斑的强度大小为随机分布;对应的相位立体图与平面图分别如图2(c)和图2(d)所示。可以看出,接收平面散斑相位有非常明显的相位卷绕现象。

1) 接收平面散斑的预处理

根据式(4),对接收孔径上的散斑进行相位解绕和插值,可以获得第 j 个预处理后的接收孔径上的散斑为 $U_{jg}(x', y', L)$ 。因此,对第 j 个接收孔径散斑幅值和相位(图2)预处理后,所得接收孔径散斑幅值的立体图与平面图分别如图3(a)和图3(b)所示。可以看出,接收孔径上的散斑幅值存在明显的起伏;对应的相位立体图和平面图如图3(c)和图3(d)所示。可以看出,接收孔径上的解绕相位呈连续型分布,且插值后的坐标网格数量 $N_2 = 3\,000$,格距 $\Delta x' = 0.3\text{ mm}$ 。

2) 接收孔径上的散斑的透镜聚焦变换

根据式(5)及式(6),对图3的第 j 个接收孔径上的散斑进行透镜聚焦变换并取模,得到第 j 个焦平面光斑光强的立体图和平面图如图4所示。可以看出,光斑中心点光强最大,周围光强呈现起伏分布。

3) 焦平面光斑加入接收端跟踪误差

根据式(7)和式(8),本文利用Matlab中的normrnd函数生成了 M 组符合高斯分布的水平跟踪误差 $\beta_{y,j}, j = 1, 2, \dots, M$ 。其中,标准差设为 $15\text{ }\mu\text{rad}$ 、均值为0。在此基础上,利用 M 个带有发射端跟踪误差的接收孔径散斑,通过前述仿真流程,依次得到 M 组焦平面光斑序列,并进一步仿真生成 M 个接收端跟踪误差,最终获得了在收发跟踪误差与大气效应共同调制下的焦平面光斑集合,其中具有代表性的3组结果如图5所示。可以看出,在接收跟踪误差影响下,焦平面光斑中心会出现显著偏移,部分光斑甚至完全偏离靶面。

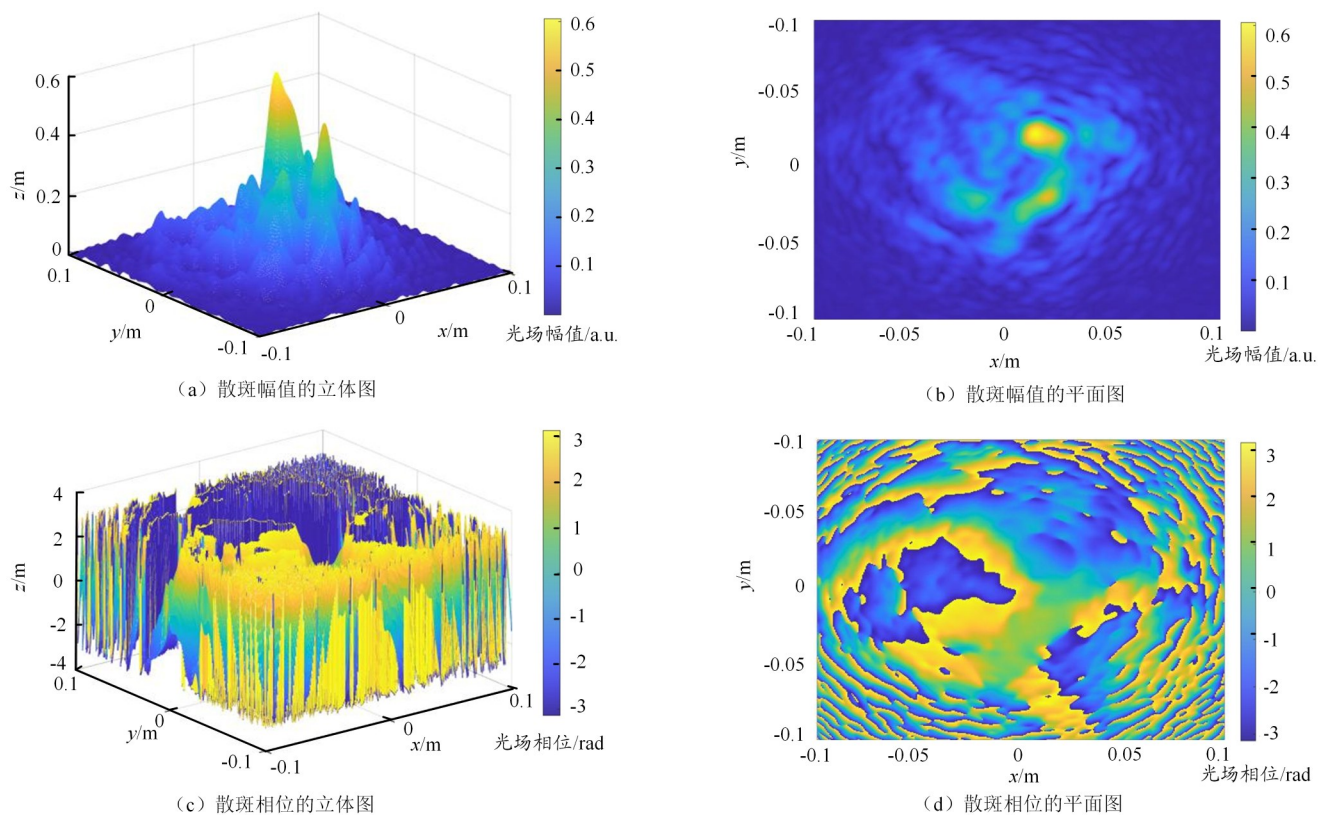


图2 第 j 个接收孔径散斑幅值和相位的立体图和平面图

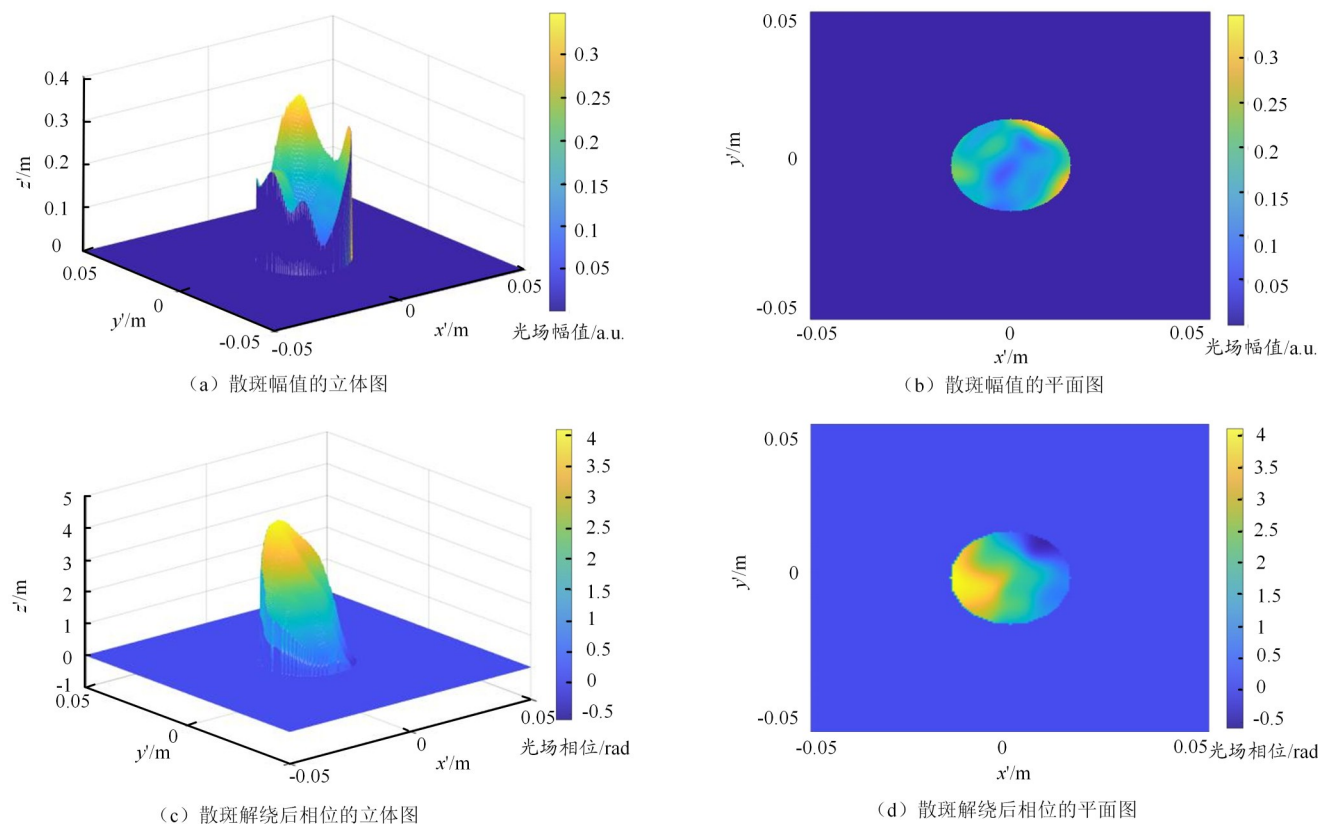


图3 第 j 个预处理后的接收孔径上散斑幅值和解绕相位立体和平面图

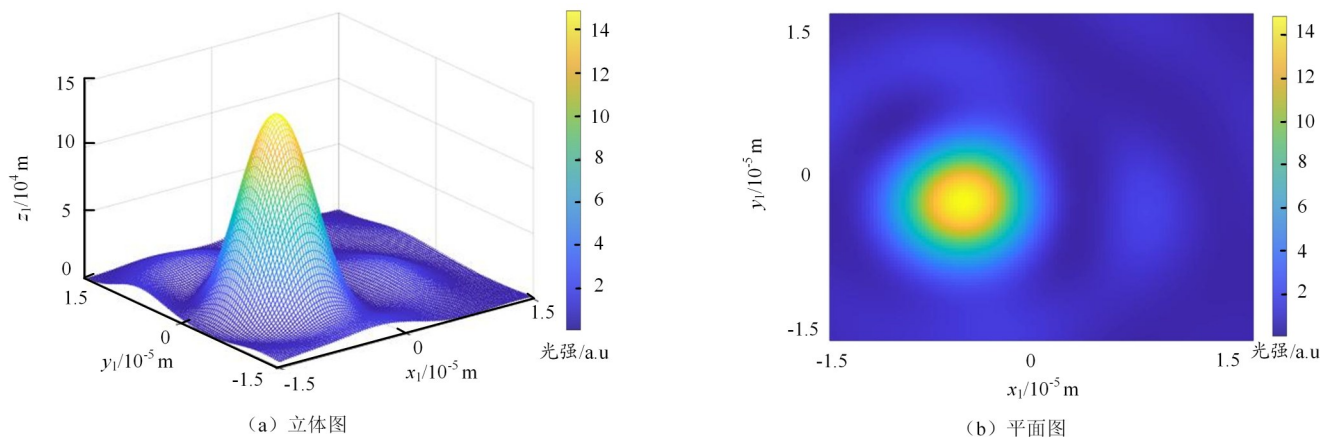


图4 第 j 个焦平面光斑光强立体图和平面图

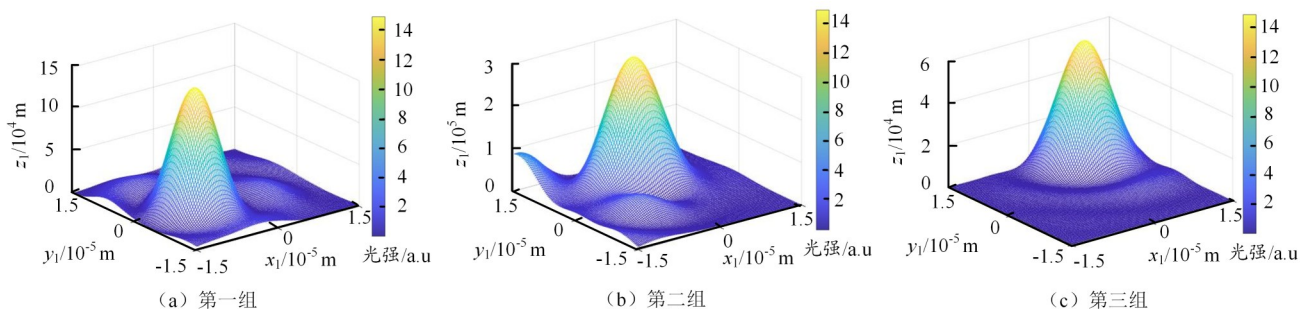


图5 不同接收端跟踪误差条件下的焦平面光斑光强分布图

4)通信探测器功率起伏及误码率仿真

本文提取前述10 000组仿真数据当中的连续40组数据,并且结合式(9)和图5对通信探测器功率起伏进行仿真。

首先,将发射跟踪误差 σ_θ 设为5、15 μrad ,Rytov方差设为0,接收跟踪误差设为0,观察 σ_θ 对功率起伏产生的影响,得到不同 σ_θ 条件下的接收功率起伏分布,如图6所示。经计算可得,当 $\sigma_\theta=5 \mu\text{rad}$ 时,接收功率的平均值为0.057 0 mW,标准方差为 1.66×10^{-6} ;当 $\sigma_\theta=$

15 μrad 时,接收功率的平均值为0.043 4 mW,标准方差为 1.24×10^{-5} 。由此可知,随着 σ_θ 的增大,接收功率起伏更加明显。

然后,设置 σ_θ 为15 μrad ,Rytov方差分别为0.4和0.8,接收跟踪误差 σ_β 为0,观察接收功率在不同湍流条件下的起伏分布,并通过对比图6,得到 σ_θ 叠加湍流之后的接收功率起伏变化情况,如图7所示。经计算可得,当Rytov方差为0.4时,接收功率的平均值为0.042 mW,接收功率的标准方差为 1.57×10^{-5} ;当Rytov = 0.8时,接收功率的平均值为0.036 2 mW,接收功率的标准方差为 2.06×10^{-5} 。由此可知,当湍流强度增大时,接收功率起伏增强。通过对比图6可以看出, σ_θ 叠加湍流后,功率起伏明显增强。

最后,将 σ_θ 设为15 μrad ,Rytov方差设为0.8, σ_β 分别设为5、15 μrad ,得到接收功率在不同 σ_β 条件下的起伏分布如图8所示。经计算可得,当 $\sigma_\beta=5 \mu\text{rad}$ 时,接收功率的平均值为0.037 5 mW,接收功率的标准方差为 2.09×10^{-5} ;当 $\sigma_\beta=15 \mu\text{rad}$ 时,接收功率的平均值为0.036 2 mW,接收功率的标准方差为 2.26×10^{-5} 。由此可知,随着 σ_β 增大,接收功率起伏增强。通过对比图7可以看出,在叠加 σ_β 的情况下,接收功率的起伏明显强于无 σ_β 时的情形。

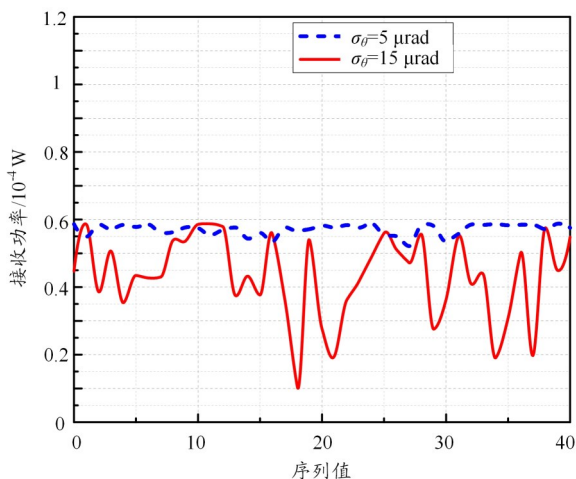


图6 不同发射端跟踪误差条件下的接收功率起伏程度

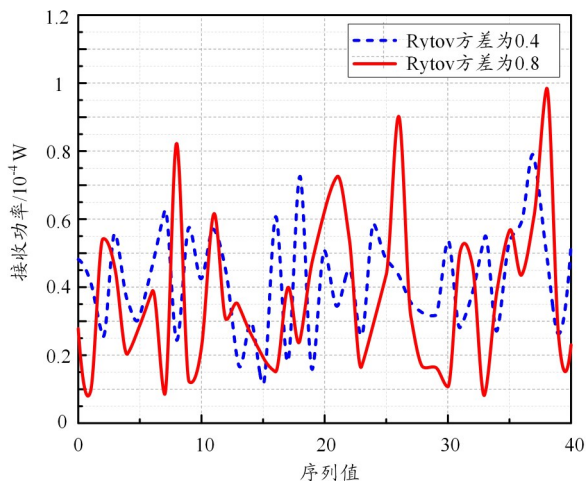


图7 不同湍流条件下的接收功率起伏程度

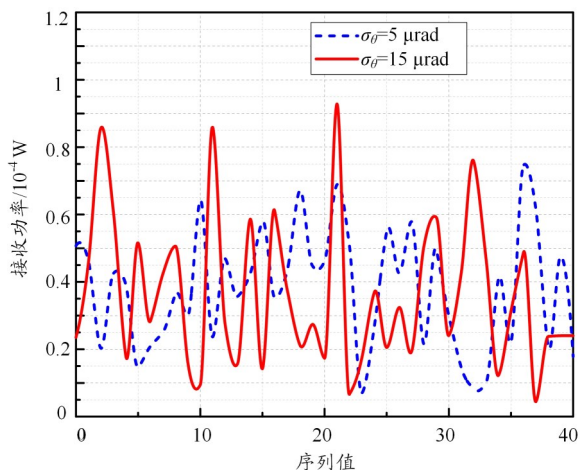


图8 不同接收端跟踪误差条件下的接收功率起伏程度

3 理论模型准确性评估与仿真验证

本文基于全链路仿真结果,对现有大气光通信性能分析理论的准确性进行评估。首先,根据接收孔径上的功率起伏PDF仿真结果,评估包含发射端跟踪误差 σ_θ 和Malaga大气光强起伏模型的功率起伏PDF理论表达式与仿真是否一致。其次,根据焦平面功率起伏PDF的仿真结果,评估同时考虑发射端跟踪误差、接收端跟踪误差和Malaga模型的功率起伏理论表达式与仿真的吻合程度。

Malaga大气光强起伏模型是一种通用模型,能够统一描述对数正态分布、Gamma-Gamma分布、K分布等多种大气光强起伏统计特性,其接收功率起伏PDF的表达式可参见文献[7]。在此基础上,有学者进一步引入接收端跟踪误差的影响,推导了焦平面接收功率起伏概率密度函数的闭合表达式^[13,14,35]。

仿真参数设置如下: $\sigma_\theta=15\mu\text{rad}$, Rytov方差为0.8, $\sigma_\beta=15\mu\text{rad}$, 探测器带宽为100 GHz^[4], 仿真组数 $M=10\,000$,与有效大尺度单元数目相关联的参数 $\alpha_1=11$, 衰落参量 $\beta_1=11$, LoS分量的平均功率 $\Omega=0.98$, 总散射分量的平均功率 $b_0=0.01$, LoS分量与耦合到LoS的散射分量之间的固定相位差 $\Delta\phi=\pi/2$, 耦合到LoS分量的散射功率 $\rho=0$ 。

接收平面和焦平面的理论及仿真PDF曲线对比结果如图9所示。其中,蓝色曲线依据文献[7]给出的发射端跟踪误差与Malaga模型理论表达式绘制,对应接收平面理论PDF曲线;紫色曲线依据文献[13,35]中同时考虑收发跟踪误差的Malaga模型理论表达式绘制,对应焦平面理论PDF曲线;绿色和红色曲线分别为本文全链路仿真得到的接收平面与焦平面PDF曲线仿真结果。可以看出,接收平面仿真PDF曲线与接收平面理论PDF曲线高度吻合,二者相关系数达0.99,表明发射端跟踪误差与Malaga模型下的接收平面理论表达式具有较高的准确性。然而,焦平面仿真PDF曲线与焦平面理论PDF曲线存在明显差异,且二者均偏离接收平面的理论与仿真曲线。这说明现有的焦平面功率起伏PDF理论模型与实际仿真结果偏差显著,需进一步修正和完善。

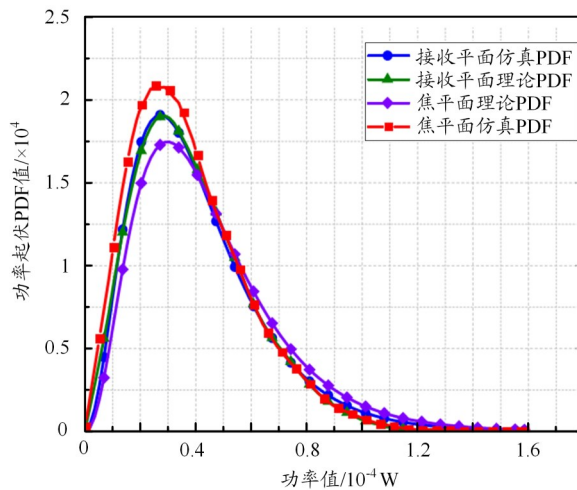


图9 接收平面和焦平面的理论及仿真PDF对比

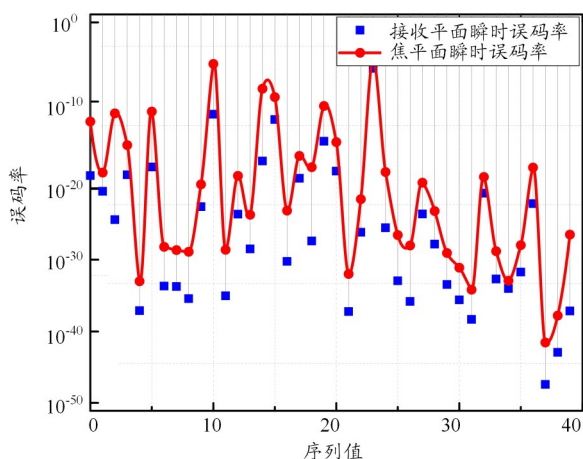
由于平均误码率是瞬时误码率和功率起伏PDF值的加权平均,因此功率起伏PDF值的准确性直接影响平均误码率的准确性。然而现有焦平面功率起伏PDF理论曲线严重偏离实际仿真结果,因此后续不再讨论基于焦平面功率起伏PDF理论推导的平均误码率。本文以大气光通信链路的平均误码率为研究对象,重点检验现有基于接收平面功率起伏PDF理论所

石卓灵,蒋大钢,牛梦晨,等:大气光通信链路综合仿真方法研究

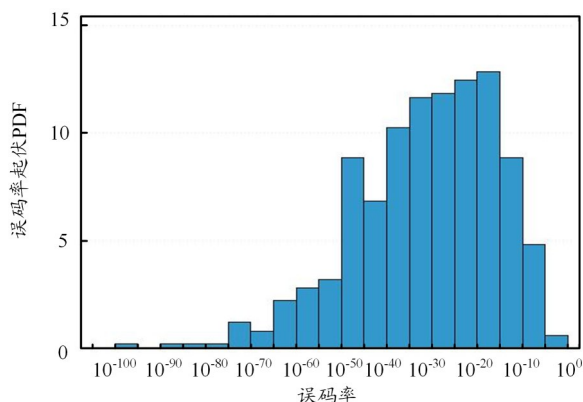
推导的平均误码率表达式的准确性。

根据文献[7, 13–14]给出的发射端跟踪误差和 Malaga 模型下接收平面平均误码率表达式, 计算得到理论平均误码率为 5.43×10^{-6} 。同时, 基于前文第2节列出的全链路仿真参数, 依据式(10)和式(11)开展 10 000 次仿真, 分别获得接收平面与焦平面的瞬时误码率序列。从中选取连续 40 组数据对比, 得到接收平面及焦平面瞬时误码率起伏对比如图 10(a)所示。可以看出, 接收平面与焦平面瞬时误码率起伏呈现明显差异; 在发射功率 P_0 为 0.39 mW, L 为 1 km, 收发跟踪误差均为 $15 \mu\text{rad}$, D_1 为 30 mm, Rytov 方差为 0.8 的湍流信道中, 受湍流与发射跟踪误差的共同影响, 接收平面瞬时误码率呈现较强波动; 而接收跟踪误差与较小接收孔径的引入, 则进一步加剧了焦平面瞬时误码率的起伏程度。进一步基于全部仿真数据, 分别绘制接收平面与焦平面瞬时误码率 PDF 直方图, 如图 10(b)和 (c)所示。可以看出, 多数瞬时误码率处于极低水平 (10^{-10} ~ 10^{-50} 量级), 但在少量深衰落事件中, 受大气湍流、收发跟踪误差及接收孔径等因素的共同影响, 瞬时误码率上升至 10^{-5} ~ 10^{-6} 量级。尽管深衰落发生概率较低, 其较高的权重仍使得 10 000 组数据的统计平均误码率最终为 10^{-6} 量级。

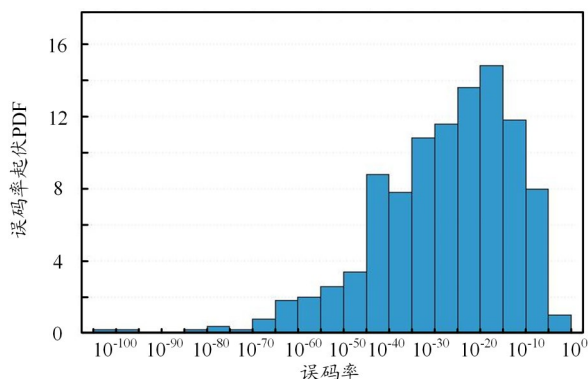
由此可见, 接收平面功率起伏 PDF 的理论仿真结果高度吻合, 两者计算出的平均误码率也较为接近, 这相互印证了理论模型的准确性。然而, 接收平面与焦平面的仿真 PDF 值存在显著差异, 致使二者的平均误码率仿真值相差约半个量级。这表明, 无论现有理论模型是否纳入接收端跟踪误差, 其所得结果与基于通信探测器实际接收功率的性能仿真之间仍存在一定差距。



(a) 瞬时误码率起伏序列对比



(b) 接收平面瞬时误码率 PDF 值



(c) 焦平面瞬时误码率 PDF 值

图 10 接收平面与焦平面误码率统计特性及平均误码率

4 结束语

本文面向大气光通信链路性能设计与理论研究的实际需求, 在现有仅考虑发射端跟踪误差和大气效应的传输过程仿真基础上, 进一步引入了包含接收端跟踪误差的完整接收过程仿真, 覆盖从接收平面散斑到焦平面光斑、再到通信探测器接收功率的全链路环节, 从而构建了一套兼顾传输与接收过程、并同时考虑收发两端跟踪误差影响的综合仿真方法。仿真结果表明, 发射孔径、发射功率、发射端跟踪误差、大气湍流、接收孔径、接收透镜焦距、接收端跟踪误差及探测器靶面尺寸等多重因素共同作用, 导致接收功率发生随机起伏, 进而引起通信误码率的动态波动。尤其是接收过程中散斑经透镜聚焦至焦平面的光场变换机制复杂, 目前尚缺乏描述该过程的精确闭合表达式。因此, 本文方法不仅能更准确地支撑大气光通信链路的性能设计与优化, 也可对相关理论模型的完善与验证提供有效的仿真工具和数值依据。

参考文献:

- [1] 李飞翔,张华伟,杨旭,等.自由空间光通信综述[J].光电技术应用, 2022,37(3):16-22.
- [2] 侯霞,刘哲琦,常亦迪,等.卫星激光通信技术发展现状与趋势分析[J].中国激光,2024,51(11):231-244.
- [3] Satrusalya S, Goswami L. Review on free space optical communication[J]. Procedia Computer Science, 2023, 218: 231-234.
- [4] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Washington: SPIE-International Society for Optical Engineering, 2005.
- [5] 饶瑞中.现代大气光学[M].北京:科学出版社,2012.
- [6] Reclons J, Andrews L, Phillips R. Analysis of beam wander effects for a horizontal path propagating Gaussian beam wave: focused beam case[J]. Optical Engineering, 2007, 46(8): 086002.
- [7] Farid A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [8] 姜会林,佟首峰,张立中,等.空间激光通信技术与系统[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [9] 王志坚,王鹏,刘智颖.光学工程原理,第2版[M].北京:国防工业出版社,2022.
- [10] Kaushal H, Jain V, Kar S. Free space optical communication[M]. India: Springer, 2017.
- [11] 陈丹,鲁萌萌,刘艳蓉.湍流信道下指向误差对自适应副载波调制性能的影响[J].光学学报,2020,40:50-58.
- [12] Jung K J, Sam S S, Alouini M S, et al. Unified finite series approximation of FSO performance over strong turbulence combined with various pointing error conditions[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(10): 6413-6425.
- [13] Singh D, Swaminathan R. Comprehensive performance analysis of hovering UAV-based FSO communication system[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(5): 1-13.
- [14] Gupta A, Dhawan D, Gupta N. Review on UAV-based FSO links: recent advances, challenges, and performance metrics[J]. Optical Engineering, 2023, 63(4): 041204.
- [15] Wijerathna E, Li X, Smith J, et al. Low-wavenumber compensation with Zernike tilt for non-Kolmogorov turbulence phase screens[J]. Applied Optics, 2023, 62(5): 1253.
- [16] 万祖阳,王潮泽,金标,等.无线光通信中畸变光强图的数值模拟[J].光通信技术,2022,46(3):81-84.
- [17] Jiang R, Wang K, Tang K, et al. Investigation of oceanic turbulence random phase screen generation methods for UWOC[J]. Photonics, 2023, 10(7): 832.
- [18] Wang K, Su X, Li Z, et al. Generation of non-kolmogorov atmospheric turbulence phase screen using intrinsic embedding fractional brownian motion method[J]. Optik, 2020, 207: 164444.
- [19] Xiang J. Fast and accurate simulation of the turbulent phase screen using fast Fourier transform[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 016110.
- [20] 杨海波,许宏.基于功率谱反演法的大气湍流相位屏数值模拟[J].光电技术应用,2019,34(4):73-76.
- [21] Liu X, Jiang D, Hu Z, et al. Single-layer phase screen with pointing errors for free space optical communication[J]. IEEE Access, 2021, 9: 104070-104078.
- [22] Yong J W, Guo Y M, Rao C H. Control method of adaptive optical system based on conjugate combined model of aberration[J]. Hongwai yu Jiguang Gongcheng/Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20190534.
- [23] Ata Y, Alouini M S. HAPS-based FSO links performance analysis and improvement with adaptive optics correction[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(7): 4916-4929.
- [24] Yang S J, Ke X Z. Experimental study on adaptive optical wavefront correction with dual mirrors in free space optical communication[J]. Optik, 2021, 242: 167146.
- [25] Li M. On performance of optical wireless communication with spatial multiplexing towards 5-G[J]. IEEE Access, 2018, 6: 28108-28113.
- [26] Li X Y, Zhao X H, Zhang P, et al. BER Performance of FSO communication system with differential signaling over correlated atmospheric turbulence fading[J]. China Communications, 2020, 17(4): 51-65.
- [27] 曹明华,武鑫,王惠琴,等. Gamma-Gamma大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J].中国激光,2020,47(9):1-10.
- [28] Jiao C M, He Y, Hu S J, et al. Effects of solar radiation on the performance of long-distance atmosphere-ocean laser communication links[J]. Optics Communications, 2025, 574: 131051.
- [29] 孙晶,黄普明,么周石.大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J].激光与光电子学进展,2021,58(3):108-113.
- [30] Hu Z, Jiang D, Liu X, et al. Performance research on flat-topped beam-based small satellites free space optical communication[J]. Optics Communications, 2021, 487: 126802.
- [31] Liu X, Zhang Y, Jiang D, et al. Fade probability simulation analysis for aircraft platform wireless optical communication based on Hermite-Gaussian beam[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2252: 012043.
- [32] Liu X, Jiang D, Zhang Y, et al. Propagation characteristics of Hermite-Gaussian beam under pointing error in free space[J]. Photonics, 2022, 9(7): 478.
- [33] Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- [34] Xu Min, Tang C, Shen Y, et al. PU-M-net for phase unwrapping with speckle reduction and structure protection in ESPI[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106824.
- [35] Dabiri M T, Rezaee M, Ansari I S, et al. Channel modeling for UAV-based optical wireless links with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14238-14246.