

指向误差下高斯光束几何衰减模型分析

刘锡国^{1,2}, 刘 敏², 毛忠阳^{1,2}, 徐建武^{1,2}, 胡 昊²

(1. 海军航空大学航空通信教研室, 山东烟台 264001; 2. 信号与信息系统山东省重点实验室, 山东烟台 264001)

摘 要: 无线光通信系统中的指向误差对光功率的几何衰减产生影响, 导致系统接收光功率的下降, 影响系统性能. 为了精确分析指向误差对无线光通信系统性能的影响, 本文基于高斯光束光强分布推导了圆形孔径下无线光通信系统接收光功率几何衰减模型的精确解析解, 仿真了不同参数条件下指向误差对系统几何衰减的影响, 验证了解析解的准确性, 并与现有模型进行了比较分析. 结果表明, 采用现有近似模型计算几何衰减存在的误差不能忽略, 因此在圆形孔径下进行模型推导更符合实际情况. 在无线光通信点对点通信及组网通信时, 采用本文所得的指向误差下的高斯光束几何衰减解析模型更为精确.

关键词: 无线光通信; 高斯光束; 指向误差; 几何衰减

中图分类号: TN912.12; O436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1893-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210285

Analysis of Geometric Attenuation Model of Gaussian Beam under Pointing Error

LIU Xi-guo^{1,2}, LIU Min², MAO Zhong-yang^{1,2}, XU Jian-wu^{1,2}, HU Hao²

(1. Aviation Communication Teaching and Research Section, Naval Aeronautic University, Yantai, Shandong 264001, China;

2. State Key Laboratory of Signal and Information Processing of Shandong Province, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: Pointing error in wireless optical communication system has an impact on the geometric attenuation of the received optical power, resulting in a decrease in the received optical power of the system and affecting the performance of the system. In order to accurately analyze the effect of pointing error on the performance of wireless optical communication system, based on the intensity distribution of Gaussian beam, the accurate analytical solution of the geometric attenuation model of received optical power in wireless optical communication system with circular aperture is derived. The influence of pointing error on the geometric attenuation of the system under different parameters is simulated, and the accuracy of the analytical solution is verified and compared with the existing model. The results show that there are errors in using the existing approximate model to calculate the geometric attenuation, and the existing errors cannot be ignored, therefore the model derivation under the circular aperture is more in line with the actual situation. In the point-to-point communication and networking communication of wireless optical communication, it is more accurate to use the Gaussian beam geometric attenuation analytical model under pointing error.

Key words: wireless optical communication; Gaussian beam; pointing error; geometric attenuation

1 引言

无线光通信, 又称自由空间光通信(Free Space Optical, FSO), 其应用场景已从传统的地面“最后一公里”点对点短距离信息传输应用发展为空间、空地、海上、水下等多种不同距离、不同速率要求的应用场景. 以空地点对点无线光通信链路为例, 受激光固有的强方向性和发射功率的限制, 需要采用 ATP(捕获、跟踪

与瞄准, Acquisition Tracking and Pointing)技术与地面端机的实时对准, 从而实现高速无线光通信, 因此不可避免地存在指向误差. 为了精确开展链路预算和性能分析, 需要对系统接收光功率进行准确建模和计算.

影响无线光通信系统接收光功率的主要因素是大气衰减和几何衰减. 大气衰减表现为湍流、闪烁、吸收

等信道特性^[1],几何衰减主要由光学系统自身结构和接收光的光场分布决定.指向误差带也是通过几何衰减来影响无线光通信性能的,特别是在基于 ATP 系统的无线光通信系统中,指向误差对系统的影响更大,必须充分考虑指向误差带来的影响.此外,当受捕获概率等其他因素限制^[2]导致接收孔径与光斑半径相差较大时,采用常用的平面波假设下的几何衰减模型进行计算,会导致计算接收光功率与实际情况有较大的误差.因此,建立高斯光束框架下的几何衰减模型,研究指向误差对几何衰减模型的影响对分析无线光通信系统的性能,实现无线光通信组网,具有重要的意义.

最先使用的几何衰减模型主要是在平面波假设下建立的模型,人们利用这类模型对不同天气情况下的无线光通信性能进行了大量的理论和实验分析,如文献[3~5]以平面波模型为基础,分析了不同条件下无线光通信系统性能.为了使性能分析更能反映实际情况,学者们考虑以高斯光束光强分布为基础建立几何衰减模型.文献[6]建立了接收孔径内作均匀分布假设和不做均匀分布假设下的功率衰减模型,比较分析了二者的异同,并以此为基础,对典型地区的无线光通信系统的有效性进行了分析.文献[7,8]在不同假设条件下建立和分析了无线光通信的几何衰减模型,但是都存在不同程度的近似.此外,上述研究中均未综合考虑指向误差因素对几何衰减模型的影响.

文献[9]基于高斯光束建立光功率衰减模型,在考虑光束漂移的情况下对无线光通信系统的误码率性能进行了分析,但是在求解几何衰减时对接收孔径内光强进行了均匀分布近似,且模型建立存在数学推导上的错误.文献[10]在高斯光源下建立了考虑光束漂移和光斑扩展的模型的积分形式,分析了光束漂移和光斑扩展,但在求解时仍进行了接收孔径内光强均匀分布的近似,也未能给出平均接收功率的封闭的解析解.文献[10,11]都给出了指向误差下几何衰减的积分表达式,但并未进行进一步的建模和定量分析;文献[12]为了计算方便,将孔径近似为正方形,在直角坐标下进行计算,推导得到了指向误差下的近似几何衰减模型,但是没有讨论与实际圆形孔径下的误差及影响因素.因此,指向误差下几何衰减模型的精确解析解还有待进一步建立.

为了研究在高斯光束下指向误差对几何衰减的影响,本文推导了高斯光束几何衰减解析模型精确解析解,分析了指向误差对系统几何衰减的影响,并与已有模型进行了仿真对比和分析,验证了模型推导的准确性.仿真结果表明,存在指向误差条件下,采用平面波

假设以及在高斯光束下采用平均近似都会对几何衰减模型产生误差,相比与精确解析解,最大误差高达 20%.本文推导得出的指向误差下高斯光束几何衰减模型结果更加精确.

2 高斯光束的空间分布

在计算无线光通信系统接收光功率时,主要考虑几何衰减.几何衰减又称为自由空间损耗或几何扩展损耗,其定义为到达接收端的光功率被接收天线有效接收的部分^[13].采用平面波模型能够简化几何衰减计算和无线光通信系统性能的分析.然而,平面波模型相对理想化,实际光端机发射的激光束为垂直于传输路径、光强在平面内服从高斯分布的光束.为建立更加精确的理论模型,应在高斯光束条件下建立模型,并进行分析.

基模高斯光束是最简单最常用的高斯光束形式^[14],将基模高斯光束作为研究对象,假设光束发射端位于 $z=0$ 处,其沿 z 轴方向传播,其光场服从高斯分布,可以表示为^[15]

$$U_0(r,0) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2} - i\frac{kr^2}{2F_0}\right) \quad (1)$$

其中, A_0 为振幅, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长, r 为 $z=0$ 点处垂直于传输路径的平面内任一点到原点的距离, W_0 为发射端的光斑半径,又称为光束的束腰, F_0 为高斯光束波阵面的曲率半径, $F_0 = \infty$ 、 $F_0 > 0$ 、 $F_0 < 0$ 分别对应于准直、会聚和发散光束.

设接收端位于 $z=L$ 处,此时该处的光场为

$$U_0(r,L) = \frac{A_0}{1+ia_0L} \exp\left[-ikL - \frac{1}{2}\left(\frac{a_0kr^2}{1+ia_0L}\right)\right] \quad (2)$$

其中,

$$a_0 = \frac{2}{kW_0^2} + i\frac{1}{F_0} \quad (3)$$

高斯光束的光强分布可写为^[9]

$$I(r,L) = I_0 \cdot \frac{W_0^2}{W_L^2} \cdot \exp\left(-2\frac{r^2}{W_L^2}\right) \quad (4)$$

其中, W_L 为 $z=L$ 处的光斑半径,此处的光强降至中心处的 $1/e^2$,它是距离 L 的函数,且服从双曲线变化规律:

$$W_L = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi W_0^2}\right)^2} \quad (5)$$

通常用发射角来表示光束的发散程度,定义高斯光束的光斑半径随传播距离的变化率为其发射角,用 θ_b 表示^[14]为

$$\theta_B = 2 \frac{dW_L}{dz} = \frac{2 \frac{\lambda L}{\pi W_0}}{\sqrt{\left[\left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda}\right)^2 + L^2\right]}} \quad (6)$$

当 L 趋于无穷大时 ($L \rightarrow \infty$), 高斯光束的发散角即为双曲线两条渐近线之间的夹角, 将其定义为高斯光束的远场发散角, 通常用 θ 来表示:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2W_L}{L} = \frac{2\lambda}{\pi W_0} \quad (7)$$

θ 和 W_0 都是高斯光束的固有参数, 当无线光通信系统的发射机结构确定时, 它们的值也就确定了.

3 无指向误差条件下光功率几何衰减模型

3.1 平面波光功率几何衰减模型

不考虑湍流因素的影响, 无线光通信系统接收光功率模型可写为^[16]

$$P_R = P_T \cdot L_{\text{geo}} \cdot L_{\text{atm}} \quad (8)$$

其中, P_T 和 P_R 分别为无线光通信设备的发射和接收光功率, L_{geo} 表征几何衰减, $L_{\text{atm}} = e^{-\mu \cdot L}$ 表征大气成分引起的吸收和散射衰减, L 为通信距离, μ 为大气衰减系数, 通常用能见度来衡量.

无线光通信的链路结构如图 1 所示, 其中, LD 和 PD 分别为发射激光器和接收探测器, D_T 和 D_R 分别为无线光通信设备的发射和接收机孔径的直径.

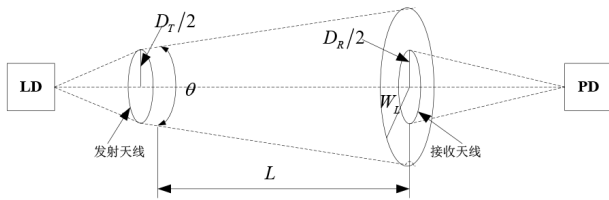


图 1 无线光通信的链路结构

假设发射光为均匀平面波, 即光强在垂直于传输路径的平面内服从均匀分布, 此时的几何衰减为^[3]

$$L_{\text{geo,pl}} = \left(\frac{D_R}{D_T + \theta \cdot L}\right)^2 \quad (9)$$

该模型是无线光通信性能分析中普遍采用的平面波光功率几何衰减模型, 但实际上, 激光器发射的激光为高斯光束, 因此需要分析高斯光束的几何衰减模型.

3.2 高斯光束几何衰减模型

激光器产生的高斯光束经过光学天线进行发射, 由于光学天线与激光器之间的距离相对于传输距离来

说一般可以忽略不计, 因此我们在研究中通常不考虑激光器和光学天线的具体参数和结构, 而将发射端看成一个整体, 其发射角为 θ , 束腰为 W_0 , 并且假设发射端位于光学天线处 (即将激光器和光学天线看成一个等效的激光器), 因此, 高斯光束假设下的接收光功率几何衰减 $L_{\text{geo, gau}}$ 可表示为

$$L_{\text{geo, gau}} = \frac{P_R}{P_T} = \frac{\int_0^{D_R/2} I(r, L) \cdot 2\pi r dr}{P_T} = \frac{\frac{\pi I_0 W_0^2}{2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{D_R^2}{2W_L^2}\right)\right]}{P_T} \quad (10)$$

显然, 只要求出发射端的总功率 P_T , 就可以得到高斯光束的几何衰减模型.

根据文献[16]的分析, 将发射端机看成一个整体的情况下, 发射光功率指的应该是发射端光学天线的出射功率, 因此

$$P_T = \int_0^{D_T/2} I(r, 0) \cdot 2\pi r dr = \frac{\pi I_0 W_0^2}{2} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{D_T^2}{2W_0^2}\right)\right] \quad (11)$$

因此, 无指向误差情况下的高斯光束几何衰减模型为

$$L_{\text{geo, gau}} = \frac{P_R}{P_T} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{D_R^2}{2W_L^2}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{D_T^2}{2W_0^2}\right)} \quad (12)$$

4 指向误差条件下高斯光束几何衰减模型

由于激光的强方向性, 无线光通信系统通常为定向收发, 其发射机和接收机之间的光路必须严格对准, 否则, 到达接收端的光功率将不能被准确探测. 发射机和接收机之间的相对运动、平台或者建筑物的抖动、ATP 系统的固有特性都会导致光路存在指向误差, 表现为接收机接收到的光斑位置发生偏移, 导致平均光功率降低, 对无线光通信系统的可用度及误码率等性能产生较大的影响.

4.1 指向误差模型

指向误差导致的接收端光束轨迹变化示意图如图 2 所示, 其中, ρ 表示高斯光束的指向误差引起的光束位移量, A 表示探测器的面积.

假设指向误差导致的 x 轴和 y 轴方向的位移满足独立同分布, 且都服从高斯分布, 则接收端的位移量可用瑞利分布来描述^[16]:

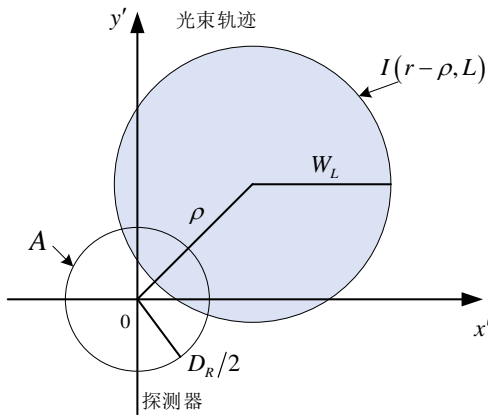


图2 探测器平面上指向误差引起的光束轨迹示意图

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{\rho}{\sigma_{\rho}^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2\sigma_{\rho}^2}\right) \quad (13)$$

其中, σ_{ρ}^2 是接收端指向误差的方差.

4.2 指向误差下几何衰减模型

如图2所示,以接收孔径中心作为坐标原点建立坐标系,存在指向误差的情况下,高斯光束的光强分布模型可以表示为^[10]

$$I(r-\rho, L) = I_0 \cdot \frac{W_0^2}{W_L^2} \cdot \exp\left[-2\frac{(r-\rho)^2}{W_L^2}\right] \quad (14)$$

将存在指向误差时的几何衰减表示为 $L_{\text{err}}(\rho)$, 它是关于指向误差位移量 ρ 的函数, $L_{\text{err}}(\rho)$ 值越大, 说明接收光功率越高, 几何衰减越小, 反之亦然. 下面对指向误差下的随机几何衰减模型进行分析, 其基本表达式为

$$L_{\text{err}}(\rho) = \frac{P_R(\rho)}{P_T} = \frac{\int_A I(r-\rho, L)}{P_T} \quad (15)$$

文献[11]中为了便于计算,在方形孔径假设下推导了近似模型:

$$L_{\text{err1}}(\rho) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2\rho^2}{W_{\text{Leq}}^2}\right) \quad (16)$$

其中, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, $v = (\sqrt{\pi} D_R/2) / (\sqrt{2} W_L)$, $W_{\text{Leq}}^2 = \frac{W_L^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$

因为实际的接收孔径为圆形,所以在极坐标下进行积分求解,将式(11)带入式(15),并令

$$L_{\text{err}}'(\rho) = L_{\text{err}}(\rho) \left[1 - \exp\left(-\frac{D_T^2}{2W_0^2}\right)\right] \quad (17)$$

可得

$$\begin{aligned} L_{\text{err}}'(\rho) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{D_R/2} \frac{2}{W_L^2} \cdot \exp\left[-2\frac{(r-\rho)^2}{W_L^2}\right] \cdot r dr d\theta \\ &= \frac{4}{W_L^2} \cdot \int_0^{D_R/2} \exp\left[-2\frac{(r-\rho)^2}{W_L^2}\right] \cdot r dr \\ &= \exp\left[-2\frac{\rho^2}{W_L^2}\right] - \frac{W_L^2}{4} \cdot \exp\left[-2\frac{(D_R/2-\rho)^2}{W_L^2}\right] \\ &\quad + \frac{4}{W_L^2} \cdot \rho \cdot \int_{-\sqrt{2}\rho/W_L}^{\sqrt{2}(D_R/2-\rho)/W_L} \exp[-x^2] \cdot \frac{W_L}{\sqrt{2}} dx \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$x = \sqrt{2}(r-\rho)/W_L \quad (19)$$

根据式(18)中 $D_R/2-\rho$ 的取值,其积分项应该分三种情况进行考虑.

(1) 当 $D_R/2-\rho > 0$, 即经过偏移影响后的光斑中心仍在接收孔径内, 则

$$\begin{aligned} &\rho \cdot \int_{-\sqrt{2}\rho/W_L}^{\sqrt{2}(D_R/2-\rho)/W_L} \exp[-x^2] \cdot \frac{W_L}{\sqrt{2}} dx \\ &= \frac{W_L \rho \sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \cdot \left[\text{erf}\left(\sqrt{2}\rho/W_L\right) \right. \\ &\quad \left. + \text{erf}\left(\sqrt{2}(D_R/2-\rho)/W_L\right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 当 $D_R/2-\rho < 0$, 即经过偏移影响后的光斑中心漂到了接收孔径之外, 则

$$\begin{aligned} &\rho \cdot \int_{-\sqrt{2}\rho/W_L}^{\sqrt{2}(D_R/2-\rho)/W_L} \exp[-x^2] \cdot \frac{W_L}{\sqrt{2}} dx \\ &= \frac{W_L \rho \sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \cdot \left[\text{erf}\left(\sqrt{2}\rho/W_L\right) \right. \\ &\quad \left. - \text{erf}\left(\sqrt{2}(\rho - D_R/2)/W_L\right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

(3) 当 $D_R/2-\rho = 0$, 即经过偏离后的光斑中心正好在接收孔径的边缘, 则

$$\begin{aligned} &\rho \cdot \int_{-\sqrt{2}\rho/W_L}^{\sqrt{2}(D_R/2-\rho)/W_L} \exp[-x^2] \cdot \frac{W_L}{\sqrt{2}} dx \\ &= \frac{W_L \rho}{\sqrt{2}} \cdot \left\{ \int_{-\sqrt{2}\rho/W_L}^0 \exp[-x^2] dx \right\} \\ &= \frac{W_L \rho \sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \cdot \text{erf}\left(\sqrt{2}\rho/W_L\right) \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $\text{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x e^{-u^2} du$ 是误差函数.

令 $u = \sqrt{2}\rho/W_L$, $v = \sqrt{2}(D_R/2-\rho)/W_L$, 有

$$L_{err}(\rho) = \begin{cases} \frac{\exp[-u^2] - \exp[-v^2] + \sqrt{\pi} \cdot u \cdot [\operatorname{erf}(u) + \operatorname{erf}(|v|)]}{\left[1 - \exp\left(-\frac{D_T^2}{2W_0^2}\right)\right]}, & D_R/2 > \rho \\ \frac{\exp[-u^2] - \exp[-v^2] + \sqrt{\pi} \cdot u \cdot [\operatorname{erf}(u) - \operatorname{erf}(|v|)]}{\left[1 - \exp\left(-\frac{D_T^2}{2W_0^2}\right)\right]}, & D_R/2 \leq \rho \end{cases} \quad (23)$$

式(23)即为存在指向误差时,高斯光束几何衰减的精确解析解模型。

理论上,当 $W_L \gg d_R/2$ 时,可以将接收平面内的光强分布看成是服从光轴中心光强的均匀分布^[10,11,17],即

$$L_{err2}(\rho) = \lim_{W_L/(D_R/2) \rightarrow \infty} L_{err}(\rho) = \frac{\pi \left(\frac{D_R}{2}\right)^2 I(0-\rho, L)}{P_T} \quad (24)$$

$$= \frac{D_R^2}{2W_L^2} \cdot \exp\left(-2\frac{\rho^2}{W_L^2}\right)$$

式(24)与式(16)相比,虽然在形式上更为复杂,但是利用该式进行数值计算时并不复杂,而且在理论推导上更为严谨精确。

4.3 指向误差下平均几何衰减模型

指向误差是一个随机变量,由式(23)可知,上述几何衰减模型仍是随着指向误差变化的随机变量。实际应用中通常会更加关注平均接收功率,因此需给出在指向误差服从瑞利分布的情况下由几何衰减引起的平均几何衰减模型。

存在指向误差时的无线光通信接收光功率模型应该可写为

$$P_R = P_T \cdot \langle L_{err} \rangle \cdot L_{atm} \quad (25)$$

其中

$$\langle L_{err} \rangle = \int_0^\infty L_{err}(\rho) \cdot f_\rho(\rho) d\rho \quad (26)$$

$f_\rho(\rho)$ 为指向误差模型,如式(13)所示。

将式(23)代入式(26),并经过化简可得

$$\langle L_{err} \rangle = \int_0^\infty L_{err2}(\rho) \cdot f_\rho(\rho) d\rho$$

$$= \frac{A}{2\sigma_\rho^2} - \frac{1}{2\sigma_\rho^2} \cdot \exp\left(-\frac{C}{2}\right) \cdot \left\{ A \exp\left(-\frac{B^2}{A}\right) + \sqrt{A} B \left[\sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{B}{\sqrt{A}}\right) + 1 \right] \right\} \quad (27)$$

其中, $A = \frac{2\sigma_\rho^2 W_L^2}{W_L^2 + 4\sigma_\rho^2}$, $B = \frac{2\sigma_\rho^2 D_R}{W_L^2 + 4\sigma_\rho^2}$, $C = \frac{D_R^2}{W_L^2 + 4\sigma_\rho^2}$, $W_L =$

$$W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi W_0^2}\right)^2}, \quad A_n = \frac{(-1)^n (n+1)}{(2n+1)}, \quad r = \frac{4\sigma_\rho^2}{W_L^2}, \quad C_n = \sum_{m=0}^{2n+1} \frac{C_{2n+1}^m (-1)^{n+m} 2^{3m/2}}{n!(2n+1)2^n} \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \left(\frac{\sigma_\rho}{D_R}\right)^m, \quad q = \frac{D_R^2}{W_L^2}.$$

根据式(27)可以得知,当收发端的光学参数和距离参数确定时,平均几何衰减模型仅与指向误差的方差有关。式(27)中,本文认为可以根据实际应用中的参数,用某一较小的 n 值来代替无穷大,仿照参考文献[11]中的方法,进行适当的化简。

5 仿真分析

5.1 几何衰减模型解析解仿真

为了验证所得几何衰减模型精确解析解的正确性,将式(23)其与式(15)的积分形式进行数值仿真对比。

假设发射和接收机口径均为 100mm,激光光束波长为 1550nm,收发端相距 10km,改变光束发散角、仿真指向误差与几何衰减的关系,如图 3 所示。

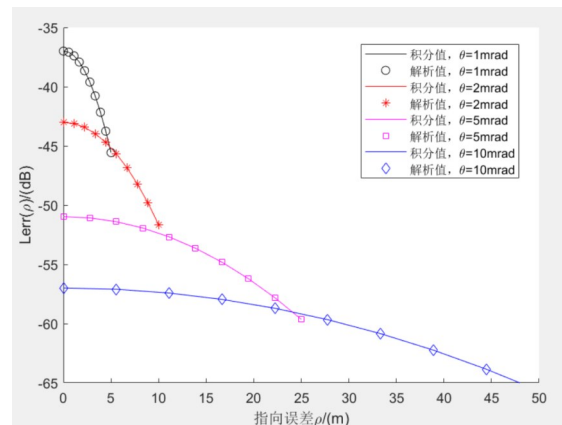


图 3 解析解模型与积分形式模型比较

由图 3 可以看出,在不同的光束发散角和指向误差情况下,采用本文推导的解析解模型得到的几何衰减与采用积分形式公式数值仿真得到的几何衰减曲线几乎完全重合,这从数值仿真的角度验证了推导的解析解模型的正确性。

5.2 精确解析解与方形孔径近似解的仿真比较

下面通过仿真分析比较本文提出的精确解析解、

文献[11]在方形孔径下得到的近似解以及采用式(24)得到的光强的均匀分布时的近似解.

假设光束发散角为 2mrad, 发射和接收机口径均为 100mm, 波长为 1550nm, 定义指向误差相对于接收孔径半径的比值 $\rho/(D_R/2)$ 为相对位移, 光斑半径相对于接收孔径半径的比值 $W_L/(D_R/2)$ 为相对孔径, 考察不同相对孔径条件下相对位移与几何衰减的关系, 仿真结果曲线如图 4 所示.

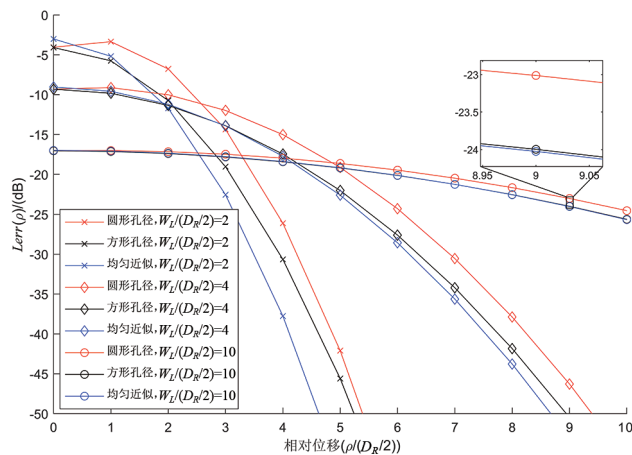


图 4 相对位移与几何衰减的关系

表 1 是不同参数时采用不同模型仿真得到的几何衰减的数值.

表 1 三种几何衰减模型在不同参数时的仿真数值

$\rho/(D_R/2)$	$W_L/(D_R/2)$	方形孔径	均匀近似	圆形孔径	最大相对误差
0	2	-4.09	-3.01	-4.05	25.6%
	4	-9.31	-9.03	-9.30	2.9%
	10	-16.99	-17.03	-17.04	0.29%
2	2	-10.73	-11.70	-6.78	72.6%
	4	-11.34	-11.20	-10.01	13.3%
	10	-17.34	-17.33	-17.14	1.2%
4	2	-30.65	-37.75	-26.12	44.5%
	4	-17.44	-17.72	-15.00	18.1%
	10	-18.38	-18.38	-17.95	2.4%
6	2	-63.86	-81.18	-62.33	30.2%
	4	-27.61	-28.57	-24.30	17.6%
	10	-20.11	-20.11	-19.46	3.3%
8	2	-85.44	-85.44	-86.82	1.6%
	4	-34.21	-35.63	-30.55	16.6%
	10	-21.25	-21.25	-20.47	3.8%

由图 4 和表 1 可以看出, 与本文推导的圆形孔径下的精确解析解相比, 在方形孔径近似及接收半径内均匀分布近似下的几何衰减模型明显不同于精确解析解

模型, 按照本节仿真参数仿真计算, 得到的误差最大可达 72.6%, 可见, 不同的近似可能引起较大的误差. 当指向误差 ρ 与孔径半径的比值小于 W_L 与孔径半径的比值时, 光斑半径越小, L_{err} 越大, 即几何衰减越小, 性能越好. 当指向误差 ρ 与孔径半径的比值大于 W_L 与孔径半径的比值时, 光斑半径越大, 几何衰减越小, 性能越好. 总的来说, 随着指向误差的增大, 采用各模型计算得到的几何衰减均不断减小, 近似下的模型会引入计算误差, 而且其误差情况根据光斑的相对大小而变化. 方形孔径近似模型与均匀近似模型所得的数值接近, 特别是相对位移较大时, 两者几乎重合, 但求得的几何衰减始终小于精确值, 采用近似模型将低估系统性能. 另外, 随着光斑半径的不断变大, 几何衰减随指向误差的变化越来越缓慢, 这说明当接收端光斑半径变大时, 接收孔径内的光强分布更接近于均匀分布. 可见, 采用圆形孔径下高斯光束分布进行计算所得的精确解析模型, 可以更好地估计几何衰减和接收光功率, 这为实际工程中的链路预算和系统设计提供了更为准确的依据.

6 结论

针对存在指向误差条件下的几何衰减精确求解问题, 本文在高斯光束光强分布条件下, 从几何衰减的物理意义出发, 在圆形接收孔径条件下, 利用极坐标系下的积分求解, 得到存在指向误差情况下的接收光功率几何衰减精确解析解模型, 通过数值仿真验证了理论模型的准确性, 并与现有的方形孔径近似模型和均匀分布近似模型进行了仿真和对比. 仿真结果表明, 指向误差对几何衰减的影响一般不能忽略, 采用方形孔径近似模型和均匀分布近似模型都有可能带来计算误差. 在圆形孔径下进行模型推导更符合实际情况. 在无线光通信点对点通信及组网通信时, 采用本文所得的指向误差下的高斯光束几何衰减解析模型更为精确, 可利用该模型开展系统设计和性能评估.

参考文献

- [1] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 1-17.
KE X Z, WU J L, YANG S J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 1-17. (in Chinese)
- [2] 滕云杰, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 基于飞艇平台激光通信系统的捕获性能研究[J]. 光学学报, 2018, 38(06): 060605.
Teng Y J, Song Y S, Tong S F, et al. Acquisition Performance of Laser Communication System Based on Airship Platform[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 060605. (in Chinese)

chinese)

- [3] Husagic A, Wajdi A K. Effect of weather conditions on Quality of Free Optics Links (with focus on Malaysia)[A]. Proceeding of the International Conference in Computer and Communication Engineering 2008, Malaysia[C].Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2008. 13 – 15.
- [4] Muhammad S S, Kohldorfer P, Leitgeb E. Channel modeling for terrestrial free space optical links[A]. Poceedings of 2005 7th International Conference Transparent Optical Networks[C].Barcelona, Spain, 2005. 407 – 410.
- [5] 鉴佃军. 无线光通信系统的大气信道特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 49 – 51.
JIAN D J. Study on the characteristics of Atmospheric channel in Wireless Optical Communication Stems [D]. Xi'an: Xidian University, 2008:46 – 51. (in Chinese)
- [6] Prokes S. Atmospheric effects on availability of free space optics systems[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 066001 – 1 – 066001 – 9.
- [7] 李玉权, 朱勇. 光通信原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 321 – 323.
- [8] 王旭, 于坤, 张明高. 量子噪声对大气激光通信系统极限通信距离的影响[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2008, (05): 627 – 630.
WANG X, YU K, ZHANG M G. Effect of the Quantum Noise on the Limiting Communication Distance of Atmospheric Laser Communication[J]. Journal of Sichuan Normal University, 2008, (05): 627 – 630. (in Chinese)
- [9] 于坤. 无线激光通信系统误码率特性研究[D]. 河南: 河南师范大学, 2008: 12 – 15, 20 – 22.
- [10] 陈纯毅. FSO 通信中的大气影响机理及抑制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009: 72 – 74.
CHEN C Y. Study on Mechanism and Mitigation Technology of Atmospheric Effects in Optical Wireless Communications[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009:72 – 74. (in Chinese)
- [11] Jose Paulo G de Oliveira. Availability of free-space optical communication systems under influence of beam wandering and optical turbulence[A]. Proc of SPIE[C]. Orlando, USA, 2009, 7324: 732406 – 1 – 732406 – 12.
- [12] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of lightwave technology, 2007, 25(7): 1702 – 1710.
- [13] Li J, Uysal M. Optical wireless communications: system model, capacity and coding[A]. 2003 IEEE, [C]. Orlando, USA, 2003.
- [14] 陈鹤鸣, 赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 64, 88.
- [15] Larry C. Andrews. Laser beam scintillation with applica-

tions[M]. USA: SPIE press, 2001. 11 – 15.

- [16] 刘敏, 刘锡国, 牟京燕, 等. 无线光通信光功率衰减模型分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(08): 2136 – 2140.
LIU M, Liu X G, MU J Y, et al. Analysis of power attenuation model for wireless optical Communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2136 – 2140. (in Chinese)
- [17] Arnon S. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless- communication systems[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 129 – 131
- [18] Jose Paulo G. de Oliveira. Statistical properties of the received current in FSO systems[A]. Proc. of SPIE[C]. Orlando, USA, 2008, 7091: 70910H – 1 – 70910H – 12.

作者简介



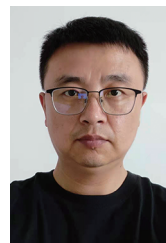
刘锡国 男, 1981年生, 山东烟台人, 博士, 海军航空大学副教授. 主要研究方向为无线光通信、航空无线电通信.
E-mail: lxx1023@163.com



刘敏(通信作者) 女, 1983年生, 山西阳泉人, 博士, 海军航空大学副教授、硕士生导师. 主要研究方向为无线光通信、航空反潜信号处理.
E-mail: liumin05@163.com



毛忠阳 男, 1979年生, 河南原阳人, 博士, 海军航空大学教授、博士生导师. 主要研究方向为抗干扰通信技术、无线光通信、智能组网.
E-mail: freedom_mzy@163.com



胡昊 男, 1978年生, 江西高安人, 博士研究生, 海军航空大学副教授. 主要研究方向为无线光通信技术、现代电子技术.
E-mail: daqi_hh@163.com



徐建武 男, 1982年生, 湖南益阳人, 博士, 海军航空大学讲师. 主要研究方向为无线光通信、编码调制技术.
E-mail: xjw1225@yeah.net