

# 无线激光通信中的多孔径接收技术研究

柯熙政 宋 鹏 裴国强

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 在大气激光通信中, 大气湍流所引起的光强闪烁会严重影响通信系统的性能, 导致系统误码率的增加, 多孔径接收是克服这种影响的有效方法。主要分析了 3 个孔径的接收性能, 并对比了多个接收孔径的接收面积的大小及相互之间的位置关系对空间平滑因子的影响, 对比了多孔径接收与单孔径接收的孔径平滑因子; 利用 Gamma-Gamma 信道模型分别从弱至强湍流区光强起伏概率密度函数分析了多孔径接收系统的误码率特性。结果表明, 多孔径接收系统可以更好地改善接收面的光强起伏, 降低系统的误码率, 并且随着接收孔径数目的增加, 系统的孔径平滑因子和误码率会进一步降低。

**关键词** 激光光学; 大气湍流; 光强起伏; 多孔径接收; 孔径平滑; 误码率

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1201003

## Research on Multi-Aperture Reception in Wireless Laser Communication

Ke Xizheng Song Peng Pei Guoqiang

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,  
Shaanxi, Xi'an 710048, China)

**Abstract** In atmospheric laser communications, light intensity flashing caused by turbulence severely interferes the performance of communication system and increases the bit error rate (BER) of the system. Multi-aperture reception is the effective method to overcome the above interference. The reception areas of multi apertures and the effect of aperture position relation on space smoothing factor are analyzed. The reception performance of three apertures, is mainly analyzed and smoothing factor of multi-aperture reception is compared with that of single-aperture reception. The probability density function of light intensity fluctuation deriving from the Gamma-Gamma channel modeling from weak turbulence band to strong turbulence band is deployed to analyze the BER of multi-aperture reception system. The result shows that multi-aperture reception system can better improve the light intensity fluctuation of reception area and decrease system's BER. With the increase of the number of aperture, the aperture smoothing factor and BER will be decreased.

**Key words** laser optics; atmospheric turbulence; light-intensity fluctuation; multi-aperture reception; aperture smoothing; bit error rate (BER)

**OCIS codes** 010.3310; 010.1330; 050.1220

## 1 引 言

大气激光通信的衰减和光强起伏问题已经成为激光传输中限制通信距离和通信性能的瓶颈。大气吸收和散射会导致激光强度严重衰减, 大气湍流会导致光束闪烁、漂移、扩展, 相位起伏、到达角起伏和波前畸变等效应; 在强湍流情况下, 光信号受到严重干扰时甚至会产生脱靶, 造成短时间通信中断, 严重

影响激光通信的可靠性<sup>[1~6]</sup>。为了克服大气湍流影响, 实现有效的信道补偿, 研究者已经提出了很多种方法, 主要方法有多光束发射和空间分集接收技术、自动增益控制 (AGC)、捕获、跟踪和瞄准技术 (ATP)、自适应光学、大孔径接收和信道编码<sup>[7~13]</sup>等方法。

自适应光学方法可以有效补偿相位起伏引起的

**收稿日期**: 2011-06-20; **收到修改稿日期**: 2011-07-19

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977054)和教育厅产业化培育项目(2010JC17)资助课题。

**作者简介**: 柯熙政(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大气激光通信与信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

光强衰减, Robert K. Tyson<sup>[14]</sup>采用自适应光学补偿方法来减弱因大气湍流引起的闪烁,该方法适用于水平传输链路及空-地上行及下行链路,分析范围涵盖了弱湍流、中湍流及强湍流的情况,但是这种方法技术复杂,价格昂贵,用于大气激光通信系统难度较大;大孔径接收方法是利用孔径平滑效应减弱接收光强的起伏, Linda M. Wasiczko 等<sup>[15]</sup>用孔径平滑理论通过实验测得了孔径大小与误码率之间的关系数据,给出了接收机的设计尺寸与接收机性能之间的最佳权衡, Frida Strömqvist Vetelino 等<sup>[16]</sup>根据对数分布和 Gamma-Gamma 分布,通过实验给出了光强的衰减统计值,并对比了高斯光束在中等至强湍流条件下不同尺寸的接收孔径的孔径平滑相关参数。但是大孔径光学器件的加工、制造难度大,造价高,体积和重量大,不适用于终端尺寸受限的大气激光通信。多光束发射技术可以有效克服大气湍流的影响、抑制接收端的光强起伏,提高系统的误码率性能。S. Mohammad Navidpour 等<sup>[17]</sup>利用空间发射分集技术分析了湍流条件下对数正态信道的链路性能,对比了 1 孔径、2 孔径及 3 孔径发射时误码率与平均信噪比的关系曲线并分析了不同相关系数对误码率的影响。由于终端空间有限,光束数目不可能无限增加,多光束发射对于减弱接收端光强起伏的作用受到了限制,接收端信号的恢复仍可能比较困难。

无线激光通信中广泛应用的分集技术是通过两个或多个不相关信号进行处理来抑制湍流条件下接收端信号的光强起伏。分集技术的基本思想是在接收端获取不同路径上的信号,然后将这些信号进行适当的合并构成总的接收信号,从而抑制信道衰减的影响,提高接收系统性能。常用的分集方式主要有时间分集、频率分集和空间分集等。可以用分集接收技术来抑制大气湍流导致的接收光强起伏。多孔径接收具有空间分集的性能,可以对光信号的起伏产生孔径平滑作用,是一种抑制大气湍流影响的有效方法。

本文分析无线激光通信中的多孔径接收技术,分析了不同大气湍流条件下多孔径接收的孔径平滑因子,并推导出湍流环境下传输脉冲位置调制 (PPM) 调制信号时,采用多孔径接收的系统误码率。

## 2 多孔径接收器的等效平均因子

图 1 是多孔径接收器的几何配置图,接收孔径为 3 个,  $r_1, r_2$  和  $r_3$  分别表示 3 个接收孔径的中心位置向量,  $\rho$  表示子接收孔径上的一个位置向量。

图 1 中的接收孔径可以是更多个。图 2 是三孔径接收系统的结构示意图。

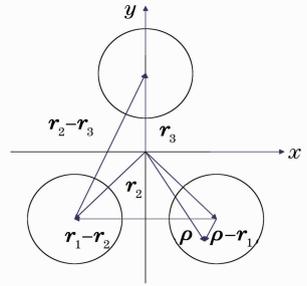


图 1 三孔径接收几何结构示意图

Fig. 1 Geometric schematic of three-aperture reception

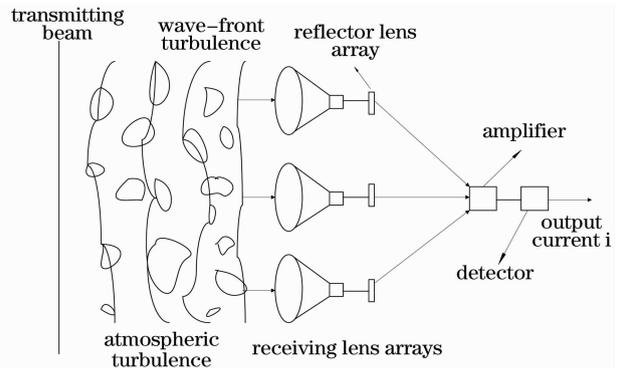


图 2 三孔径接收系统的结构示意图

Fig. 2 Schematic of three-aperture reception system

假设  $N$  个子孔径的形状和尺寸都相同,则包含  $N$  个孔径的接收系统接收到的总的瞬时光通量为

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \int_{S_i} T(D, \rho - r_i) I(\rho) d\rho, \quad (1)$$

式中  $I(\rho)$  为接收平面上位置  $\rho$  处的光强,  $T(D, \rho - r_i)$  是孔径函数<sup>[1]</sup>,  $D$  为接收孔径直径,圆形孔径的孔径函数为

$$T(D, \rho') = \begin{cases} 1 & |\rho'| \leq D/2 \\ 0 & |\rho'| > D/2 \end{cases} \quad (2)$$

令  $R = \rho - r_i$ ,且  $N$  个子孔径具有相同的孔径函数,对(1)式作变量代换,可得

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} T(D, R) \sum_{i=1}^N I(R + r_i) dR, \quad (3)$$

$N$  个子孔径收到的平均总光强(即  $\Phi$  的一阶矩)可写为

$$\langle \Phi \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} T(D, R) \sum_{i=1}^N \langle I(R + r_i) \rangle dR, \quad (4)$$

对于平面波,有  $\langle I(\rho_1) \rangle = \langle I(\rho_2) \rangle = \langle I \rangle$ ,则当使用圆形接收孔径时,  $\langle \Phi \rangle = \pi ND^2 \langle I \rangle / 4$ .  $\Phi$  的方差定义为  $\sigma_\Phi^2 = \langle (\Phi - \langle \Phi \rangle)^2 \rangle = \langle \Phi^2 \rangle - \langle \Phi \rangle^2$ .由(3)式和(4)式可得

$$\sigma_{\Phi}^2 = \iint_{SS'} T(D, \mathbf{R}') T(D, \mathbf{R}) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \langle I(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i) \times I(\mathbf{R}' + \mathbf{r}_j) \rangle d\mathbf{R} d\mathbf{R}' - \iint_{SS'} T(D, \mathbf{R}') T(D, \mathbf{R}) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\langle I(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i) \rangle \times \langle I(\mathbf{R}' + \mathbf{r}_j) \rangle] d\mathbf{R} d\mathbf{R}', \quad (5)$$

式中  $\mathbf{R} + \mathbf{r}_i$  及  $\mathbf{R}' + \mathbf{r}_j$  为接收平面上的位置向量,  $I(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i)$  和  $I(\mathbf{R}' + \mathbf{r}_j)$  则表示波面上任意点处的光强。对(5)式做变量代换  $\mathbf{x} = \mathbf{R} - \mathbf{R}'$ , 则可化为

$$\sigma_{\Phi}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \iint_{SS'} T(D, \mathbf{R}) T(D, \mathbf{R} - \mathbf{x}) C_I(\mathbf{x} + \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) d\mathbf{R} d\mathbf{x}, \quad (6)$$

根据孔径接收系统的孔径平滑因子的定义式<sup>[2]</sup>, 可以得出多孔径接收系统平滑因子的定义式:

$$A = \frac{\sigma_{\Phi}^2}{\left(\frac{N\pi D^2}{4}\right)^2 C_I(0)}, \quad (7)$$

式中  $C_I(0) = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle$  为光强方差。由(6)和(7)式可得

$$A = \frac{16}{(N\pi D^2)^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \iint_{SS'} T(D, \mathbf{R}) T(D, \mathbf{R} - \mathbf{x}) C_I(|\mathbf{x} + \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) d\mathbf{R} d\mathbf{x}, \quad (8)$$

式中  $C_I(\cdot)$  为光强空间协方差函数, 可定义为

$$C_I(|\mathbf{x} + \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) = C_I(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i, \mathbf{R}' + \mathbf{r}_j) = \langle I(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i) I(\mathbf{R}' + \mathbf{r}_j) \rangle - \langle I(\mathbf{R} + \mathbf{r}_i) \rangle \langle I(\mathbf{R}' + \mathbf{r}_j) \rangle, \quad (9)$$

令  $K(\mathbf{x}) = \int_S T(D, \mathbf{R}) T(D, \mathbf{R} - \mathbf{x}) d\mathbf{R}$ ,  $K(\mathbf{x})$  是接收孔径的调制传递函数, 表示为

$$K(\mathbf{x}, D) = \begin{cases} \frac{D^2}{2} \left\{ \arccos\left(\frac{\mathbf{x}}{D}\right) - \left(\frac{\mathbf{x}}{D}\right) \left[1 - \left(\frac{\mathbf{x}}{D}\right)^2\right]^{-1/2} \right\}, & |\boldsymbol{\rho}| \leq D \\ 0, & |\boldsymbol{\rho}| > D \end{cases} \quad (10)$$

则可得到多孔径接收系统的孔径平滑因子的表达式为

$$A = \frac{16}{(N\pi D^2)^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{\Phi}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|), \quad (11)$$

$C_{\Phi}(|\cdot|)$  函数为

$$C_{\Phi}(|\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}|) = \int_0^D K(\mathbf{x}) C_I(|\mathbf{x} + \boldsymbol{\rho}|) / C_I(0) d\mathbf{x}, \quad (12)$$

基于 Andrews 提出的大尺度起伏调制小尺度起伏理论<sup>[6]</sup>, 由零内尺度模型可以将光强起伏方差函数写为

$$C_I(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}) = \exp[C_{\ln x}(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}) + C_{\ln y}(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x})] - 1, \quad (13)$$

式中  $C_{\ln x}(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x})$  和  $C_{\ln y}(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x})$  分别是大尺度和小尺度对数强度协方差,  $|\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}|$  为波面上任意两点之间的距离。在平面波传播的情况下, 大尺度对数协方差可以写为<sup>[2]</sup>

$$C_{\ln x}(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}) = 1.06\sigma_i^2 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \eta^{-11/6} \exp(-\eta/\eta_x) J_0[(\rho + \rho') \sqrt{k\eta/L}] \times (1 - \cos \eta\xi) d\eta d\xi \approx 0.15\sigma_i^2 \eta_x^{7/6} {}_1F_1[7/6; 1; -0.25k(\rho + x)^2 \eta_x/L], \quad (14)$$

式中  $\sigma_i^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  为 Rytov 方差,  $J_0(\cdot)$  为第一类零阶 Bessel 函数,  ${}_1F_1$  为合流超几何函数(也即库默尔函数),  $\eta_x = 3/[1 + L/(k\rho_0^2)]$ , 它是无量纲参数,  $L$  为传输距离,  $k$  为波数,  $\rho_0 = (1.46k^2 LC_n^2)^{-3/5}$  为平面波横向相干长度,  $\xi = z/L$  和  $\eta = L\kappa^2/k$  是无量纲参数。小尺度对数强度协方差可写为<sup>[2]</sup>

$$C_{\ln y}(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}) = 1.06\sigma_i^2 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (\eta + \eta_y)^{-11/6} J_0[(\rho + x) \sqrt{k\eta/L}] (1 - \cos \eta\xi) d\eta d\xi \approx 1.265\sigma_i^2 \left[ \frac{k(\rho + x)^2}{L\eta_y} \right]^{5/12} K_{5/6} \left\{ \left[ \frac{k(\rho + x)^2 \eta_y}{L} \right]^{1/2} \right\}, \quad (15)$$

式中  $K_{5/6}(\cdot)$  是变形的 Bessel 函数,  $\eta_y = 3 + 1.7L/(k\rho_0^2)$ 。

$$C_l(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x}) = \exp \left\{ 0.15\sigma_l^2 \eta_x^{7/6} {}_1F_1[7/6; 1; -0.25k(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x})^2 \eta_x / L] + 1.265\sigma_l^2 \left[ \frac{k(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x})^2}{L\eta_y} \right]^{5/12} \times \right. \\ \left. K_{5/6} \left\{ \left[ \frac{k(\boldsymbol{\rho} + \mathbf{x})^2 \eta_y}{L} \right]^{1/2} \right\} \right\} - 1, \quad (16)$$

将(16)式代入(12)式,再由(11)式可得到多孔径接收系统的孔径平滑因子表达式。

图 3 是在不同湍流环境下用 3 个孔径进行接收时的孔径平滑因子,其中传输距离为 1000 m,激光波长为 810 nm,接收孔径数为  $n$ ,可以看出:

1) 随着孔径直径的增大孔径平滑因子减小得很快,但是当孔径增大到一定程度时孔径平滑因子的减小趋于平缓;

2) 对于弱湍流,系统的孔径平滑因子随着孔径的增大迅速的减小,且远小于 0.1,孔径平滑作用十分显著,对于中湍流和强湍流孔径平滑作用也很明显;

3) 3 个孔径接收的性能要好于单个大孔径接收。

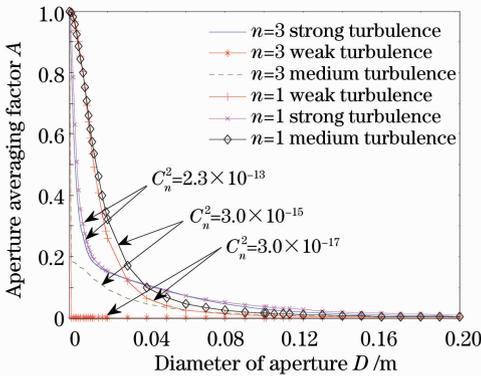


图 3 不同湍流条件下单孔径接收与三孔径接收系统的性能比较

Fig. 3 Performance comparison of single-aperture and three-apertures reception system under different turbulence conditions

图 4 是在强湍流环境下,当接收孔径直径分别为 0.02,0.03,0.04,0.05 和 0.06 m 时,当各个接收孔径之间的间距变化时的孔径平滑因子,可以看到每条曲线都随着孔径间距的增大在逐渐变小,但随着孔径间距增大,减小的幅度越来越平缓,不同的孔径对应的最佳间距不同,它们分别对应各自的孔径平滑因子趋于平缓的接收孔径的点。

图 5 是在强湍流下,当接收孔径及孔径间距为固定值时,2 孔径、3 孔径、4 孔径和 5 孔径接收的孔径平滑因子的计算结果。可以看出随着接收孔径个数的增加,孔径平滑因子在减小。

图 6 是在强湍流条件下不同数目接收孔径对应

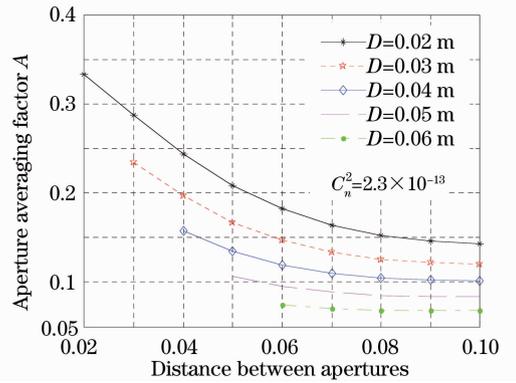


图 4 不同接收孔径所对应的孔径平滑因子随孔径间距变化的关系

Fig. 4 Relation of aperture smoothing factors with different reception apertures with the change of aperture interval

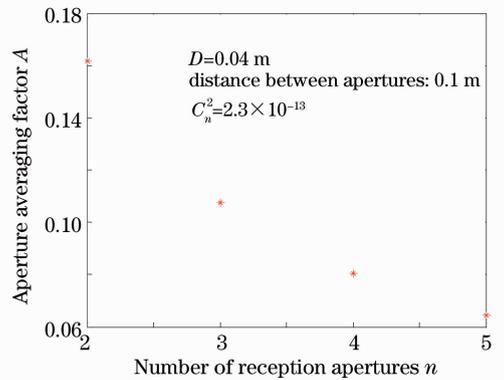


图 5 不同数目的接收孔径对应的孔径平滑因子值

Fig. 5 Aperture smoothing factors of different reception-aperture numbers

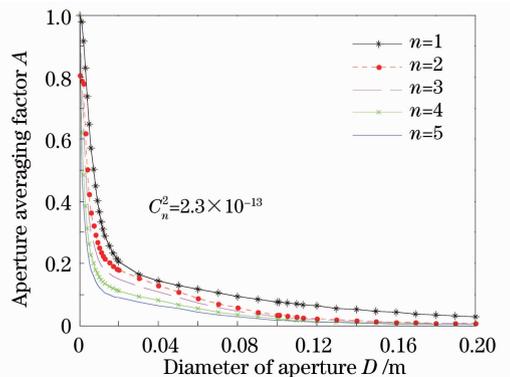


图 6 不同数目的接收孔径对应的孔径平滑因子曲线

Fig. 6 Aperture smoothing factor curves of different reception-aperture numbers

的孔径平滑因子曲线,孔径间距为 0.4 m。图中曲线表明孔径数目越多孔径平滑因子越小,当孔径直径为 0.12 m 时,孔径平滑因子趋于平缓,继续增大孔径面积孔径平滑作用不大。

图 7 是在中湍流条件下不同数目接收孔径对应的孔径平滑因子曲线,孔径间距为 0.4 m。相比于强湍流环境,中湍流下的空间平滑因子要小很多。

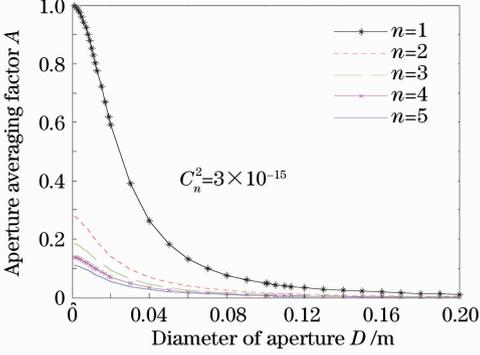


图 7 不同数目接收孔径对应的孔径平滑因子曲线

Fig. 7 Aperture smoothing factor curves of different reception-aperture numbers

### 3 信道误码率性能分析

系统的误码率(BER)依赖于平均接收功率、孔径上的闪烁以及接收噪声(主要是热噪声和散粒噪声),它随大气湍流的变化而变化。

在没有湍流的情况下,系统的信噪比为  $R_{SN_0} = i_s / \sigma_n$ ,  $\sigma_n^2$  为散粒噪声方差、暗电流方差和热噪声方差之和。光信号通过大气湍流后探测器的输出信噪比为<sup>[3]</sup>

$$\langle R_{SN} \rangle = \frac{i_s}{\sigma_N^2} = \frac{R_{SN_0}}{\sqrt{\frac{P_{S_0}}{\langle P_S \rangle} + A\sigma_i^2 R_{SN_0}^2}}, \quad (17)$$

式中  $P_{S_0}$  为没有湍流时的信号光功率。对于 PPM 调制系统,当不存在湍流影响时,系统的误码率为<sup>[4,5]</sup>

$$R_{BE\_PPM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L}{2} \operatorname{lb} L (LR_{SN})} \right], \quad (18)$$

当存在湍流影响时,PPM 系统的误码率是对光强起伏概率密度函数求平均,也就是对用 Gamma-Gamma 信道建模的从弱至强湍流区光强起伏概率密度函数<sup>[6]</sup>

$$P(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} [2(\alpha\beta I)^{1/2}], \quad (19)$$

$$I > 0$$

求平均。式中  $\alpha = 1/\sigma_x^2 = 1/[\exp(\sigma_{\ln x}^2) - 1]$ ,  $\beta = 1/\sigma_y^2 = 1/[\exp(\sigma_{\ln y}^2) - 1]$ ,  $\sigma_{\ln x}^2$  和  $\sigma_{\ln y}^2$  分别是大尺度起伏方差和小尺度起伏方差,  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数,  $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$  为第二类修正 Bessel 函数。

$$\sigma_{\ln x}^2(D) = \frac{0.16\sigma_i^2\eta_x^{7/6}}{(1+d^2\eta_x/4)^{7/6}}, \quad (20)$$

它与接收孔径尺寸有关,式中  $d = \sqrt{kD^2/(4L)}$ ,  $\eta_x = 2.61/(1 + 1.11\sigma_i^{12/5})$  为无量纲参数,  $\sigma_i^2 = 1.23C_n^2k^{7/6}L^{11/6}$  为 Rytov 方差:

$$\sigma_{\ln y}^2(D) = \frac{1.27\sigma_i^2\eta_y^{-5/6}}{1 + 0.3d^2\eta_y}, \quad (21)$$

式中  $\eta_y = 3(1 + 0.69\sigma_i^{12/5})$  是无量纲参数。

由(18)和(19)式可得到 PPM 信号的误码率一般表达式为

$$R_{BE} = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L}{2} \operatorname{lb} L \langle R_{SN} \rangle s} \right] \times s^{(\alpha+\beta)/2-1} \cdot K_{\alpha-\beta} (2\sqrt{\alpha\beta s}) ds, \quad (22)$$

将(17)式代入(22)式可推得湍流大气中多孔径接收系统的误码率为

$$R_{BE} = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L}{2} \operatorname{lb} L \frac{R_{SN_0}}{\sqrt{\frac{P_{S_0}}{\langle P_S \rangle} + A\sigma_i^2 R_{SN_0}^2}}} s} \right] \times s^{(\alpha+\beta)/2-1} \cdot K_{\alpha-\beta} (2\sqrt{\alpha\beta s}) ds, \quad (23)$$

$\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数,  $P_{S_0}$  为无湍流影响时的信号光功率。当忽略大气湍流引起的光束扩展时,  $P_{S_0}/\langle P_S \rangle = 1$ 。

图 8 是用 3 个孔径接收时,采用 256-PPM 信号传输的误码率曲线图,接收孔径分别为 0.01, 0.02, 0.03 和 0.05 m,大气折射率结构常数为  $2.3 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ,随着接收孔径的增大,误码率逐渐降低。

图 9 是当  $C_n^2 = 2.3 \times 10^{-13}$  时,不同数目接收孔径在接收孔径直径为 0.05 m 时的误码率曲线,发送信号采用 256-PPM 信号,曲线表明,当接收数目增加时误码率曲线也随之下降,但是下降的比较平缓,误码率随着信噪比的增加下降到了很小的数量级,图中纵坐标采用对数刻度。

图 10 是当  $C_n^2 = 3 \times 10^{-15}$  时,不同数目接收孔径

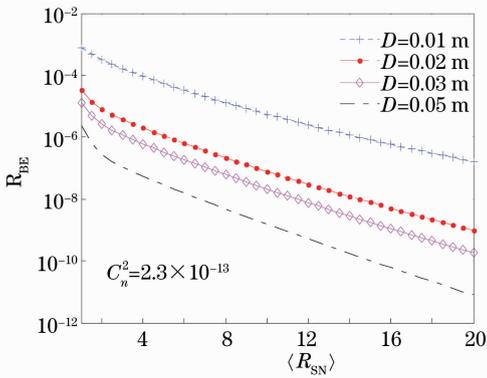


图 8 不同接收孔径的误码率与信噪比的关系曲线  
Fig. 8 Relation curves of  $R_{BE}$  and  $R_{SN}$  with different reception apertures

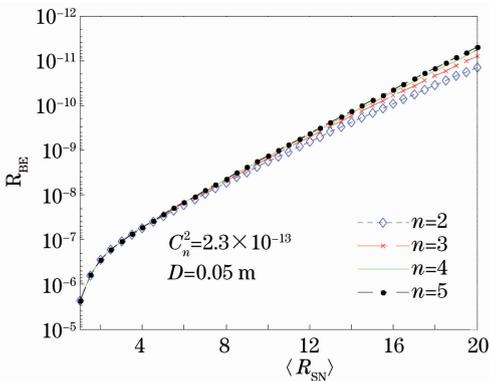


图 9 不同个数接收孔径接收的误码率曲线  
Fig. 9 BER curves with different number of reception apertures

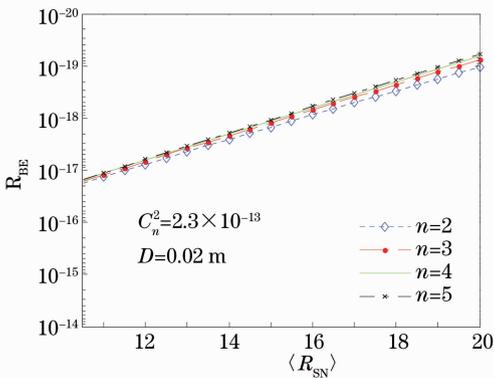


图 10 湍流进一步降低时,不同个数接收孔径接收的误码率曲线

Fig. 10 BER curves with different number of reception aperture when turbulence decreases

在接收孔径直径为 0.02 m 时,256-PPM 传输信号的误码率曲线,对比图 9 与图 10 可以看出随着湍流强度的下降,误码率迅速下降。

图 11 是当分别采用 8-PPM, 16-PPM 和 256-PPM 信号传输时的信噪比与误码率关系曲线,可以看出当 PPM 信号的时隙数增加时,接收信号的误

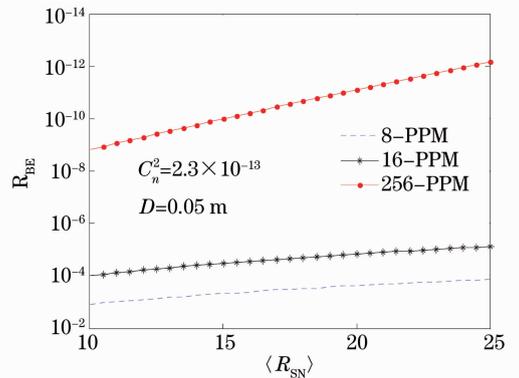


图 11 不同 PPM 传输信号在接收端的误码率曲线  
Fig. 11 BER curves at receiver with different PPM signals

码率也明显下降。

## 4 结 论

分析了不同湍流环境下用不同数目的接收孔径进行信号接收时的孔径平滑效应及孔径平滑因子的变化;结果表明在相同的湍流环境下,当接收面积相同时,采用多孔径接收的性能要优于单孔径接收;用相同个数孔径接收时孔径平滑因子会随着湍流的减弱而逐渐减小,当减小到一定程度时趋于平缓,继续增大孔径面积不能进一步有效地抑制湍流。推导了湍流环境下采用 PPM 调制时多孔径接收系统的误码率公式,分析了不同个数及不同接收面积接收孔径接收系统的的误码率特性,并分析了不同湍流条件下的误码率随信噪比的变化关系;最后比较了不同长度数据位的 PPM 信号的误码率特性,为无线激光接收系统的设计提供了理论基础。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman. Statistical Optics [M]. John Wiley & Sons, 1985. 222
- 2 Zhang Yixin. The Transmission and Imaging of the Light Wave in Random Medium[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 228~229  
张逸新. 随机介质中光的传播与成像[M]北京:国防工业出版社,2002. 228~229
- 3 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. Laser beam scintillation with applications[C]. SPIE, 2001. 211~212
- 4 E. A. Lee, D. G. Messerschmitt. Digital Communication[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. 178~266
- 5 J. R. Barry. Wireless infrared communication [J]. Proc. IEEE, 1997, 85(2): 265~298
- 6 Frida Stromqvist Vetelino, Cynthia Young, Larry Andrews. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence[J]. Appl. Opt., 2007, 46(11): 2099~2108
- 7 James H. Churnside. Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere[J]. Appl. Opt., 1991, 30(15): 1982~1994

- 8 Ke Xizheng, Wang Huiqin. Atmosphere laser communication in MIMO channels and its key techniques[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(3): 52~54  
王惠琴, 柯熙政. MIMO 大气激光通信及其关键技术[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(3): 52~54
- 9 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical Bell Labs layered space-time[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 874~878  
王惠琴, 柯熙政. 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 874~878
- 10 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum[J]. *Waves in Random Media*, 2000, **10**(1): 53~70
- 11 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024  
马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中的多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- 12 J. R. Minch, D. R. Gervais, D. J. Townsend. Adaptive transceivers for mobile free-space optical communications [C]. IEEE Military Communications Conference, 2006. 1~5
- 13 Shane M. Haas, Jeffrey H. Shapiro, Vahid Tarokh. Space-time codes for wireless optical communications [C]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing 2002, **3**: 211~220
- 14 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**: 753~758
- 15 Heba Yuksel, Stuart Milner, Christopher Davis. Aperture averaging for optimizing receiver design and system performance on free-space optical communication links [J]. *J. Opt. Network*, 2005, **4**: 462~475
- 16 Frida Strömqvist Vetelino, Cynthia Young, Larry Andrews. Fade statistics and aperture averaging for Gaussian beam waves in moderate-to-strong turbulence [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**: 3780~3789
- 17 S. Mohammad Navidpour, Murat Uysal, Mohsen Kavehrad. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2007, **6**(8): 2813~2819

栏目编辑: 谢 婧