

CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响

贺元兴^{1,2,3} 李新阳^{2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
³中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 建立圆环聚焦平面光束通过 Kolmogorov 湍流大气的远场传输模型, 考虑实际 CCD 所存在的“死区”及非线性饱和效应等非线性光电响应特征, 以中心遮拦比为 0.5 的圆环聚焦光束为例, 分别计算了其通过不同强度湍流大气传播至远场焦平面上的实际真实远场光强分布曲线和 CCD 测量远场光强分布曲线, 并以峰值斯特雷尔比 R_s 、光束质量因子 β 和环围能量比 R_{ee} 三种参数作为评价远场光斑质量的指标, 考察了死区大小以及光斑非线性饱和程度对实际远场光强分布的测量和光束质量评估的影响, 对计算结果以及减小测量误差的解决途径进行了分析讨论。

关键词 测量; 远场焦斑; 光束质量; CCD“死区”; 非线性饱和效应; 湍流大气

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0408001

Analysis of Influence of CCD's Nonlinear Response Characterization on Measurement Results of Focal Spot and Beam Quality

He Yuanxing^{1,2,3} Li Xinyang^{2,3}

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract The far-field propagation model of annular plane beam through Kolmogorov atmospheric turbulence is presented and the nonlinear response characterization, such as so called "dead zone" and nonlinear saturation effect of CCD sensor are considered as well, the theoretical far-field irradiance profiles of annular beam with obscuring ratio 0.5 under different turbulence strengths and their corresponding measurement results with CCD are calculated. The parameters of peak Strhel ratio R_s , beam quality factor β and encircled energy ratio R_{ee} are taken as evaluating far-field spot quality. The influence of dead zone and nonlinear saturation effect of CCD on measurement results of far-field spot profile and beam quality are analyzed, and the approaches to eliminate the measurement errors are discussed.

Key words measurement; far-field focal spot; beam quality; CCD's dead zone; nonlinear saturation effect; turbulent atmosphere

OCIS codes 122.4800; 040.1520; 010.1300; 010.1330; 230.0040

1 引言

远场焦斑空间能量分布的测量以及光束质量评

估计算是激光光学领域十分重要的研究课题。由于远场焦斑的空间能量分布包含了非常丰富

收稿日期: 2011-10-13; 收到修改稿日期: 2011-12-16

作者简介: 贺元兴(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: yuanxing-he@163.com

导师简介: 李新阳(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学和高能激光技术等方面的研究。

E-mail: xyli@ioe.ac.cn

量信息,对其进行准确测量是正确评估光束质量的前提。目前,远场焦斑的测量方法很多,有扫描法、感光法、烧蚀法和阵列探测法等^[1]。扫描法测量远场焦斑对光源的稳定性有一定要求;感光法和烧蚀法均存在不能准确定量的问题;阵列探测法[如基于电荷耦合器件(CCD)成像方法]克服了前三种测量方法的不足,具有实时性好、灵敏度高和数据处理方便等诸多优点,已经成为测量远场焦斑空间分布以及光束质量的主要手段。在实际应用中发现,CCD对入射激光能量的光电响应特性往往并非满足严格的线性变化规律,表现出一定的非线性响应特征,这主要包括两方面,即 CCD“死区”的存在和非线性饱和效应^[2]。“死区”使得当入射激光能量小于某一特征能量阈值时 CCD 并没有相应的输出响应,当入射激光能量超过“死区”范围之后,CCD 的输出响应才可以反映入射光能量的变化,二者成简单的线性关系,随着入射激光能量的进一步增加而超出 CCD 的线性响应范围后,CCD 的输出与入射激光能量之间的线性变化规律被破坏,表现为 CCD 的输出响应呈现出一定的饱和效应,此时 CCD 的输出已不能反映真实入射激光能量信息。显然,“死区”以及非线性饱和效应均会影响对实际远场光斑强度分布的测量及光束质量的评估,因此研究二者对测量结果的影响便显得尤为重要。激光经 Kolmogorov 湍流大气的远场传输问题是人们普遍关心的经典问题^[3,4],从分析大气湍流波像差对远场光斑质量以及能量集中度的影响来看,峰值斯特雷尔比(Strehl ratio) R_S 、光束质量因子 β (亦称光束 β 值)以及环围能量比 R_{ee} 是该应用领域里用得较多的光束质量评价指标^[5,6]。本文将通过建立环形聚焦平面光束通过 Kolmogorov 湍流大气的远场传输模型以及描述 CCD 光电响应非线性特征的简化模型,全面考察 CCD“死区”以及非线性饱和效应对实际远场光强分布和三种光束质量评价参数测量结果的影响,并对减小测量误差的途径进行讨论,为实际工作提供一定的理论指导和参考。

2 理论模型

2.1 环形聚焦平面光束远场传输模型

对于有限孔径发射光束,在通过局地均匀、各向同性湍流大气传输距离 z 后到达接收平面,根据广义惠更斯-菲涅耳原理,在近轴近似下,接收面上 \mathbf{P} 点处的平均光强为^[7]

$$\langle I(\mathbf{P}, z) \rangle = \left(\frac{k}{2\pi z} \right)^2 \times \frac{1}{A} \int \exp[-i(k/z)\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{P}] \tau(\boldsymbol{\rho}) d^2\boldsymbol{\rho}, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长; $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$, \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 为发射孔径内任意两点的位置矢量; $\tau(\boldsymbol{\rho})$ 为整个光束传输系统的调制传递函数(MTF),可表示为

$$\langle \tau(\boldsymbol{\rho}) \rangle = A \int \langle G\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) \times G^*\left(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) U\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) \times U^*\left(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) \exp[i(k/z)\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}] d^2\mathbf{r}, \quad (2)$$

式中,角括号 $\langle \rangle$ 表示统计平均值; A 为归一化系数,使得 $\langle \tau(0) \rangle = 1$; $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2$; $U(\mathbf{r})$ 为发射孔径内光波复振幅分布; $G(\mathbf{r})$ 表示由发射孔径内 \mathbf{r} 点发出的球面波经湍流大气到达接收面上 \mathbf{P} 点处光场的扰动量,对于 Kolmogorov 湍流,满足局地均匀、各向同性条件,(2)式等号右边被积函数中的摄动项可表示为^[8]

$$\langle G\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) G^*\left(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) \rangle = \exp[-3.44(\rho/r_0)^{5/3}]. \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,则激光传输系统总的调制传递函数可表示为无湍流扰动激光发射系统的调制传递函数 $\tau_0(\boldsymbol{\rho})$ 与大气湍流所对应的调制传递函数之积,则(2)式可表示为

$$\langle \tau(\boldsymbol{\rho}) \rangle = \tau_0(\boldsymbol{\rho}) \exp[-3.44(\rho/r_0)^{5/3}], \quad (4)$$

式中

$$\tau_0(\boldsymbol{\rho}) = A \int U\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) U^*\left(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}\right) \times \exp[i(k/z)\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{r}] d^2\mathbf{r}. \quad (5)$$

假设 D 、 d 分别为环形聚焦发射系统发射端的外圆及中心挡板直径,中心遮拦比 $\epsilon = d/D$,发射激光的总功率为 P_t ,则发射孔径所在平面内光波场复振幅分布为

$$U(\mathbf{r}) = \begin{cases} \sqrt{\frac{4P_t}{\pi D^2(1-\epsilon^2)}} \exp\left(-\frac{ik|\mathbf{r}|^2}{2f}\right), & d/2 \leq |\mathbf{r}| \leq D/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

式中 f 为聚焦系统的有效焦距。将(6)式代入(4)、(5)式,由圆对称性, $\tau(\boldsymbol{\rho})$ 、 $\tau_0(\boldsymbol{\rho})$ 仅依赖于 ρ ,并且(5)式右边积分项在数值上等于中心间隔为 ρ 的两个圆环重叠区域的归一化面积,归一化系数 A 为发射激光的总功率 P_t 的倒数。

由傅里叶-贝塞尔变换,并令 $u = \rho/D$, 远场焦面上的平均光强分布(1)式可进一步表示为

$$\langle I(\alpha, f) \rangle = \frac{2\pi D^2 P_t}{(\lambda f)^2} \int_0^1 \langle \tau(u, \epsilon) \rangle J_0(2\alpha u) u du, \quad (7)$$

式中 $\alpha = kDP/(2f)$ 为接收平面上的归一化半径; $J_0(x)$ 为第一类零阶贝塞尔函数。

采用相同发射功率、相同发射口径的环形光束通过大气湍流传输至远场平面的峰值光强对(7)式做归一化,并乘以系数 I_p , 从而得到峰值光强为 I_p 的远场相对平均光强分布

$$\langle I(\alpha, f) \rangle_{\text{real}} = I_p \frac{\int_0^1 \langle \tau(u, \epsilon) \rangle J_0(2\alpha u) u du}{\int_0^1 \langle \tau(u, \epsilon) \rangle u du}. \quad (8)$$

2.2 CCD 光电响应非线性特征描述

CCD 光敏面上每一个像素单元对应于一个势阱,当入射至某些光敏单元的入射光子数增加到一定值后,导致该势阱被所产生的光电子填满,那么多余的光电子将会溢出并流向相邻像素势阱,从而导致不希望出现的晕效应^[9]。为了避免上述情况发生,目前大多数 CCD 在设计和制造的过程中都会引入反晕沟道,以便将超过势阱一定高度后的多余光电子排出而不干扰相邻光敏元的光电荷信息,这就导致 CCD 的光电响应规律并非满足严格的线性特性,表现出非线性饱和输出响应特点。此外,CCD 光电荷在转移过程中受表面态的俘获造成的损失或 CCD 背景噪声起伏均可能导致“死区”的出现。抓住 CCD 光电响应非线性的主要特征,并根据文献[9]的做法,本文构造的用于描述 CCD 非线性光电响应规律的理论模型表示为

$$I_{\text{out}} = N\{I_{\text{input}}\} = \begin{cases} 0, & 0 \leq I_{\text{input}} < I_0 \\ I_{\text{input}} - I_0, & I_0 \leq I_{\text{input}} < 0.6 + I_0 \\ 0.5(I_{\text{input}} - I_0) + 0.3, & 0.6 + I_0 \leq I_{\text{input}} \leq 1 + I_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $N\{\dots\}$ 表示光电响应非线性变换运算符; I_0 为死区上限; CCD 输出与入射激光能量在数值上均为相对值。

图 1、2 分别给出不存在“死区”($I_0 = 0$)和存在“死区”($I_0 = 0.1$)两种情况下 CCD 的光电响应特性曲线。由图 1 可以看出,在入射激光相对能量小于 0.6 时,CCD 的光电响应呈现出良好的线性响应特性,随着入射激光能量的进一步增强,CCD 的光电

响应输出缓慢增加,呈现出非线性饱和效应。图 2 与图 1 的唯一区别在于当入射激光相对能量小于某一特征能量阈值(0.1)时,CCD 并没有输出响应,只有入射激光相对能量超过该特征值之后 CCD 才会有响应。

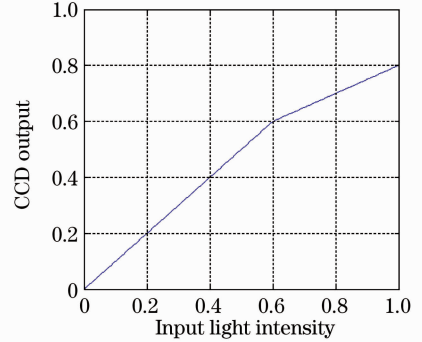


图 1 光电响应特性曲线(无死区)

Fig. 1 Photon-electronic response curve without dead zone

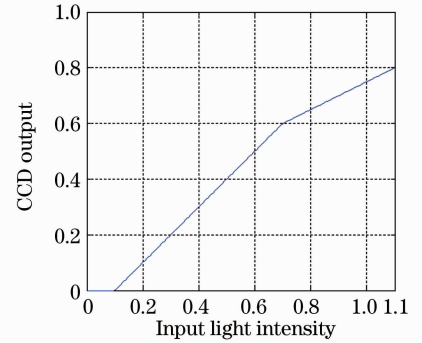


图 2 光电响应特性曲线(有死区)

Fig. 2 Photon-electronic response curve with dead zone

如果不考虑 CCD 对实际远场光斑的积分采样和截断误差影响,而仅仅考察非线性光电响应特性对测量结果的影响时,远场光强分布的测量结果可表示为

$$\langle I(\alpha, f) \rangle_m = N\{\langle I(\alpha, f) \rangle_{\text{real}}\}. \quad (10)$$

2.3 光束质量评价指标及计算

为了衡量大气湍流波像差对远场光斑质量的影响,峰值斯特雷尔比 R_s 、光束质量因子 β 以及环围能量比 R_{ee} 是用得较多的评价指标。

峰值斯特雷尔比 R_s 定义为实际远场光斑峰值光强与理想远场光斑峰值光强之比。该评价指标对波像差比较敏感,在大气光学与自适应光学领域用得较多。如果定义理想光斑为相同发射功率、相同发射口径环形平面光束所对应的衍射受限远场光斑,则利用(10)式可得到存在 CCD 光电响应非线性影响情况下 R_s 的数学表达式为

$$R_S = \frac{\max\{\langle I(\alpha, f) \rangle_m\}}{\max\{\langle I(\alpha, f) \rangle_{ideal}\}}, \quad (11)$$

式中, $\max\{\dots\}$ 为取最大值函数; $\langle I(\alpha, f) \rangle_{ideal}$ 为理想光斑强度分布, 可通过将(8)式存在像差情况下调制传递函数 $\tau(u, \epsilon)$ 替换为衍射受限系统调制传递函数 $\tau_0(u, \epsilon)$ 计算得到。

光束质量因子 β 是强激光领域评价激光远场能量集中度的十分重要的指标, 它定义为实际远场光斑环围能量半径 r_{real} 与理想远场光斑环围能量半径 r_0 之比。环围能量半径是根据规范能量份额定义的, 即以光斑质心为中心, 包含规范能量份额的桶的半径, 通常情况下, 规范能量份额 P_0 取为衍射受限理想光斑中心亮斑占光斑总能量的百分比, 对于理想艾里斑, $P_0 = 83.8\%$, $r_0 = 1.22\lambda f/D$, 对于中心存在遮拦的环形光束, 随着遮拦比的增大, 规范能量份额 P_0 和 r_0 均将逐渐变小。光束质量因子 β 在数学上可表示为

$$\beta = \frac{r_{real}}{r_0}, \quad (12)$$

式中, 实际远场光斑的环围能量半径 r_{real} 满足

$$\frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{r_{real} \pi D / (\lambda f)} \langle I(\alpha, f) \rangle_m \alpha d\alpha}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} \langle I(\alpha, f) \rangle_m \alpha d\alpha} = P_0. \quad (13)$$

环围能量比 R_{ec} 是衡量激光远场能量集中度的另一个比较常用的评价指标, 定义为理想光斑在规范桶内所含有的激光能量份额 P_0 与实际光斑在相同规范桶内所含有的能量份额 P_{real} 之比的平方根, 即

$$R_{ec} = \sqrt{P_0 / P_{real}}, \quad (14)$$

式中, 实际远场光斑在相同规范桶内所含的能量份额 P_{real} 可表示为

$$P_{real} = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{r_0 \pi D / (\lambda f)} \langle I(\alpha, f) \rangle_m \alpha d\alpha}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{+\infty} \langle I(\alpha, f) \rangle_m \alpha d\alpha}. \quad (15)$$

至此, 得到了圆环形聚焦平面光束经 Kolmogorov 大气湍流传播至远场焦平面上的光强分布(8)式, 考虑 CCD 光电响应非线性特性(9)、(10)式, 利用峰值斯特雷尔比 R_S 、光束质量因子 β 以及环围能量比 R_{ec} 的计算公式(11)~(15)式, 就可以分析由于 CCD 光电响应非线性特性对远场光斑测量及光束质量评价指标计算的影响。

3 计算结果及分析

根据 2 节所建立的理论模型, 对由于 CCD 光电响应非线性特性对远场光斑强度测量以及光束质量评价参数评估的影响进行计算和讨论, 实际光束取为中心遮拦比为 0.5 的圆环形平面光束, 规范能量份额 P_0 约为 48%, 规范桶半径 r_0 为 $\lambda f/D$ 。

3.1 不存在“死区”情况

图 3 为圆环形聚焦平面光束通过不同强度湍流大气传播至远场焦平面上的归一化真实光强分布曲线[见图 3(a)]及由于 CCD 非线性响应特性而导致的相应测量曲线[见图 3(b)], 湍流强度由归一化后的发射直径 D/r_0 衡量, 图中分别计算了 $D/r_0 = 0$ (在真空传输), 1, 2, 3 和 5 五种不同湍流情况, CCD 光电响应特性(响应曲线如图 1 所示)仅存在非线性饱和输出而不存在“死区”($I_0 = 0$)。由图 3 可以看出, 由于 CCD 光电响应的非线性饱和效应, 当入射激光强度超过 CCD 线性响应范围之后, CCD 测量结果存在一定程度的饱和, 表现为远场焦斑中心主核区域的强度分布数据与真实强度数据相比偏小(峰值由理论真实值 1 降至测量值 0.8), 测量的远

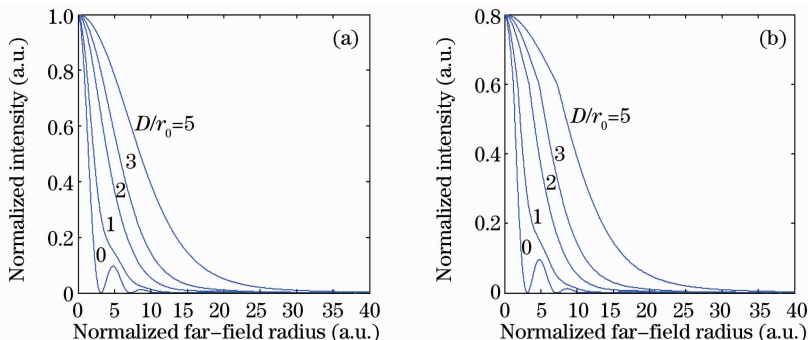


图 3 不同湍流强度下的远场光强分布。(a)线性响应;(b)非线性响应

Fig. 3 Far-field irradiance profiles for different turbulence strengths. (a) Linear response; (b) nonlinear response

场光强分布已经不能反映实际真实情况。

图 4 为通过图 3(a)和图 3(b)两组远场光强分布曲线分别计算得到的光束质量评价参数峰值斯特雷尔比 R_s [见图 4(a)]、光束质量因子 β [见图 4(b)]及环围能量比 R_{ec} [见图 4(c)]随湍流强度 D/r_0 的变化曲线。从计算结果的数值上来看,峰值斯特雷

尔比 R_s 的测量值较真实值偏小、光束质量因子 β 较真实值偏大、环围能量比 R_{ec} 较真实值也将偏大,当选择上述三种评价指标来衡量实际光束质量时,评价参数测量评估结果将较实际真实结果偏差,从而导致低估了实际光束的质量。

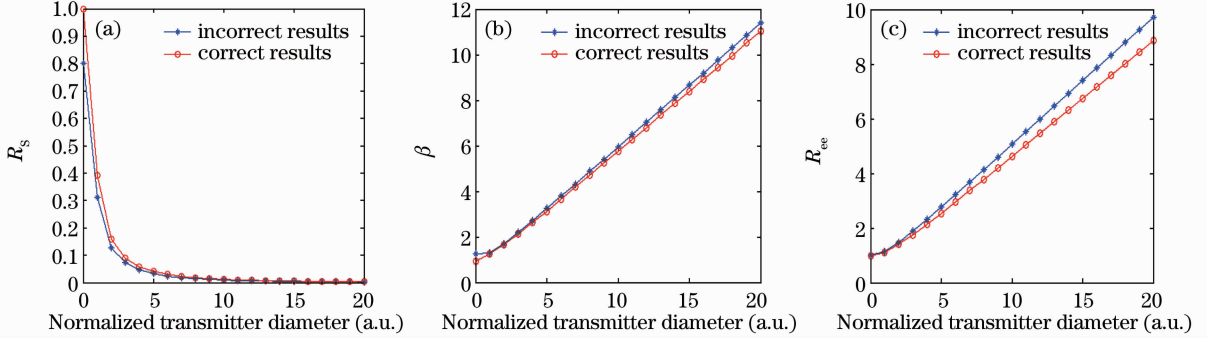


图 4 光束质量评价参数随湍流强度的变化。(a)峰值斯特雷尔比 R_s ;(b)光束质量因子 β ;(c)环围能量比 R_{ec}

Fig. 4 Beam quality measures changing with turbulence strength. (a) Strehl ratio R_s ; (b) beam quality β factor; (c) encircled energy ratio R_{ec}

3.2 存在“死区”情况

图 5 为圆环形聚焦平面光束通过不同强度湍流大气传播至远场焦平面上的归一化真实光强分布曲线[见图 5(a)]及由于 CCD 非线性响应特性而导致的相应测量曲线[见图 5(b)],与图 3 类似,图中分别计算了 $D/r_0 = 0$ (在真空传输),1,2,3 和 5 五种不同湍流情况,CCD 光电响应特性(响应曲线如图 2)同时存在非线性饱和输出及“死区”($I_0 = 0.1$)。由

图可以看出,一方面,由于 CCD 光电响应的非线性饱和特性,当入射激光强度超过 CCD 线性响应范围之后,CCD 测量结果存在一定程度的饱和,表现为远场焦斑中心主核区域的强度分布数据与真实强度数据相比偏小(峰值由理论真实值 1.1 降至测量值 0.8);另一方面,由于 CCD“死区”的影响,造成实际远场光斑的大量幅度较小的空间分布特征丢失,测量结果已经更加不能反映实际真实情况。

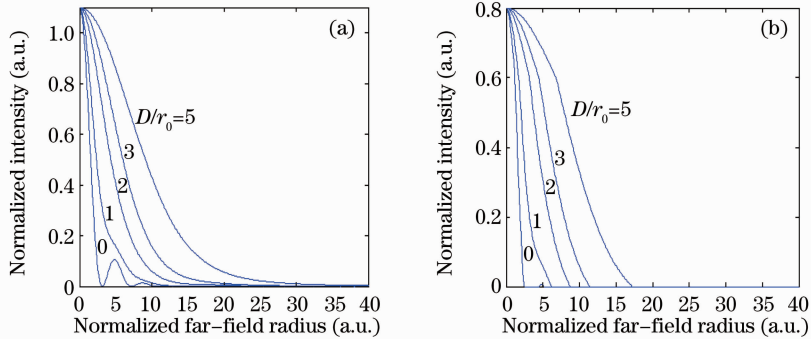


图 5 不同湍流强度下的远场光强分布。(a)线性响应;(b)非线性响应

Fig. 5 Far-field irradiance profiles for different turbulence strengths. (a) Linear response; (b) nonlinear response

图 6 为通过图 5(a)和图 5(b)两组远场光强分布曲线分别计算得到的光束质量评价参数峰值斯特雷尔比 R_s [见图 6(a)]、光束质量因子 β [见图 6(b)]及环围能量比 R_{ec} [见图 6(c)]随湍流强度 D/r_0 的变化曲线。与无“死区”情况有所不同,从计算结果的数值上来看,峰值斯特雷尔比 R_s 、光束质量因子 β

以及环围能量比 R_{ec} 的测量值均较真实值偏小,当选择峰值斯特雷尔比 R_s 作为评价指标时,评估结果将较实际真实结果偏差,从而导致采用 R_s 会低估实际光束的质量;当选择光束质量因子 β 或环围能量比 R_{ec} 作为评价指标时,评估结果将较实际真实结果偏好,从而导致过于乐观地估计了实际光束的质量。

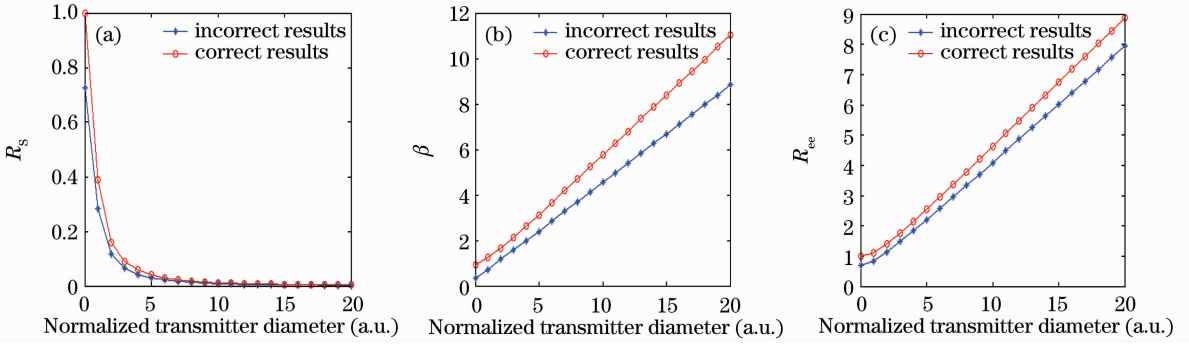


图 6 光束质量评价参数随湍流强度的变化。(a)峰值斯特列比 R_s ; (b)光束质量因子 β ; (c) 环围能量比 R_{ee}
 Fig. 6 Beam quality measures changing with turbulence strength. (a) Strehl ratio R_s ; (b) beam quality β factor; (c) encircled energy ratio R_{ee}

3.3 存在“死区”和不存在“死区”的比较

图 7 给出湍流强度 $D/r_0 = 3$ 时, 远场光斑采用具有不同死区大小的 CCD 测量后峰值斯特雷尔比 R_s [见图 7(a)]、光束质量因子 β [见图 7(b)] 及环围能量比 R_{ee} [见图 7(c)] 的测量结果随实际光斑峰值的变化曲线, 并给出 $D/r_0 = 3$ 时三种评价指标的真实数值以便比较。图中计算了 I_0 为 0, 0.001, 0.01, 0.05 和 0.1 五种不同“死区”的情况。不难看出, 1) 当不存在“死区”时 ($I_0 = 0$), 在激光峰值光强较弱处于 CCD 的线性响应范围内, 三种光束质量评价参数的测量值均可靠地反映了实际真实值, 然而随着光斑峰值光强的进一步增加超出 CCD 线性响应区后, 由于非线性饱和效应使得 R_s 逐渐减小、光束 β 值和 R_{ee} 均逐渐增加, 三种评价指标的测量结果均不同程度低估了实际光束的质量, 其中 R_s 的测量结果对 CCD 非线性饱和输出效应更为敏感; 2) 当存在“死区”时 ($I_0 \neq 0$), 对 R_s 来讲, 其测量值要始终小于实际真实值, 因此, 如果采用 R_s 作为评价指标将会低估实际光束的质量, 而且随着“死区”的增加, 这种“低估”会更加显著, 当实际光斑峰值取 CCD 线性响应区上限时, R_s 的测量结果将最接近

实际真实值; 从光束 β 值曲线以及环围能量比 R_{ee} 曲线的变化趋势来看, 二者的测量结果均随实际光斑峰值呈递增变化规律, 在数值上, 即使对于非常小的死区 ($I_0 = 0.001$, 约 CCD 测量范围的 1/1000), 光束 β 值的测量结果也将始终小于实际真实值, 因此, 如果选择光束 β 值作为衡量远场光斑质量的评价指标, 将会始终高估实际光束的质量, 且随着“死区”的增加, 这种“高估”将会更加显著; 与光束 β 值略有不同, 当“死区”非常小 ($I_0 = 0.001$) 时, 在 CCD 线性响应区上限和 CCD 最大响应输出值之间会存在某一临界值, 当远场光斑峰值恰好取该临界值时, R_{ee} 的测量结果与其实际真实值相等; 当远场光斑峰值小于该临界值时, R_{ee} 的测量结果小于实际真实值, 此时选择 R_{ee} 指标将会高估实际光束的质量, 当远场光斑峰值大于该临界值时, R_{ee} 的测量结果将大于实际真实值, 此时选择 R_{ee} 指标将会低估实际光束的质量; 随着死区的增加 ($I_0 \geq 0.01$), 临界值超出 CCD 的响应范围, R_{ee} 的测量结果将始终小于实际真实值, 此时选择 R_{ee} 作为评价指标将高估了实际光束的质量, 且随着“死区”的增加, 这种“高估”也会更加明显。

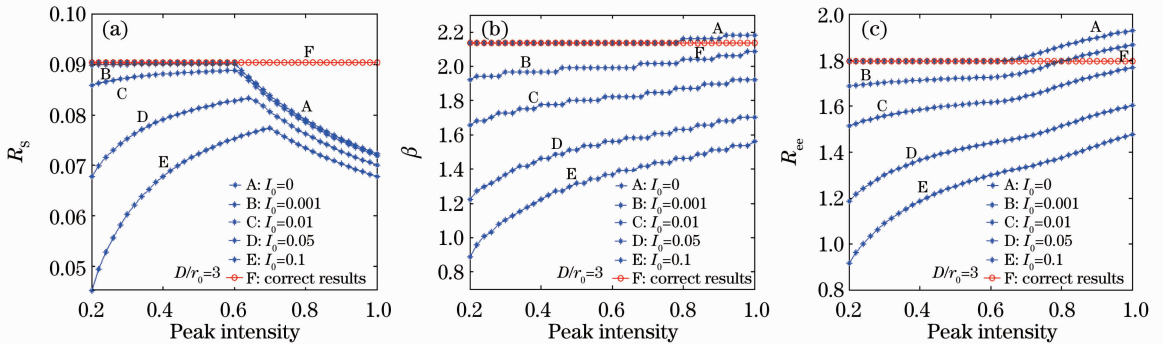


图 7 光束质量评价参数随光斑峰值光强的变化。(a)峰值斯特列比 R_s ; (b)光束质量因子 β ; (c) 环围能量比 R_{ee}
 Fig. 7 Beam quality measures changing with peak intensity. (a) Strehl ratio R_s ; (b) beam quality β factor; (c) encircled energy ratio R_{ee}

3.4 减小测量误差的措施

“死区”以及远场光斑的饱和程度均不同程度地影响了光束质量的测量结果。在实际中,往往引入合适的衰减使远场光斑的测量数据处于 CCD 线性响应区以内,以消除 CCD 非线性饱和效应对测量结果的影响,然而,“死区”的存在却是无法消除的光束质量测量误差源,它使得峰值斯特雷尔比 R_s 、光束 β 值以及 R_{ee} 均不同程度的小于实际真实值。通过上节的分析可知,在 CCD 的线性响应范围内,当实际光斑峰值取 CCD 线性响应区上限时,以上三种评价指标的测量结果与实际真实值都最为接近,此时的测量误差也将最小。图 8 给出圆环形聚焦平面光束通过不同强度湍流大气传播至远场焦平面,远场峰值斯特雷尔比 R_s [见图 8(a)]、光束 β 值 [见图 8(b)] 以及 R_{ee} [见图 8(c)] 的测量相对误差随“死区”的变化曲线,远场焦斑的峰值强度取为该“死区”情况下 CCD 线性响应区上限,“死区”大小以其占

CCD 线性响应区上限的百分比来衡量。图中分别计算了 $D/r_0=0$ (在真空传输), 1, 2, 3 和 5 五种不同强度湍流情况。由图不难看出,不同湍流强度所对应的远场焦斑峰值斯特雷尔比 R_s 随死区大小的变化规律是一致的,二者之间成简单的线性关系,因此要使 R_s 的测量相对误差控制在一定范围内,只需控制“死区”大小使其占据 CCD 线性响应区上限相同的百分比即可;而对于光束 β 值和 R_{ee} 来讲,二者的测量误差随着死区的增大而逐渐增大,线性规律不再满足,且较小的死区就可以引起较大的指标测量相对误差,当湍流强度 $D/r_0=0$ 时,为了使光束 β 值和 R_{ee} 的测量相对误差在 10% 之内,死区占 CCD 线性响应区上限的百分比需要分别控制在 1% 和 2% 以内,随着湍流强度的增加,由于远场焦斑低幅度高频成分的增多,必须更小的死区才能够满足相同的测量精度要求。

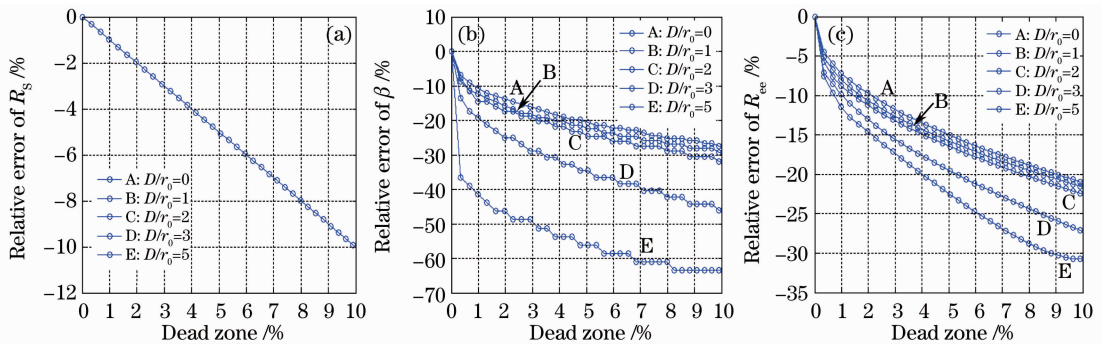


图 8 不同湍流强度下光束质量评价参数测量相对误差随死区大小的变化。(a)峰值斯特雷尔比 R_s ; (b)光束质量因子 β ; (c)环围能量比 R_{ee}

Fig. 8 Beam quality relative measurement error changing with dead zone under different turbulence strengths.

(a) Strehl ratio R_s ; (b) beam quality β factor; (c) encircled energy ratio R_{ee}

除了上述要求远场光斑的测量灰度数据不饱和之外,通过事先对 CCD 光电响应特性进行标定以及采取有效的焦斑重构方法拓展 CCD 测量动态范围^[10,11]的方法,均可起到消除或减小由于 CCD 非线性响应特性而带来的光束质量测量误差的目的,在实际远场分布测量和光束质量计算中常被采用。

4 结 论

通过建立环形聚焦平面光束通过 Kolmogorov 湍流大气的远场传输模型以及 CCD 光电响应非线性特征的理论模型,考察了由于 CCD 光电响应的非线性特性而造成对实际远场光强分布测量和三种常见的光束质量评价参数(峰值斯特雷尔比 R_s 、光束质量因子 β 和环围能量比 R_{ee})计算的影响。研究结

果表明:

1) 当 CCD 光电响应特性不存在“死区”,远场焦斑峰值处于 CCD 的线性响应区内时,三种光束质量评价参数的测量结果均能够反映真实情况,随着激光峰值光强的进一步增加,由于 CCD 的非线性饱和效应使得峰值斯特雷尔比 R_s 的测量结果较真实值偏小,而光束质量因子 β 和环围能量比 R_{ee} 测量结果较真实情况偏大,这三种评价参数的测量结果都不同程度地低估了实际光束的质量;

2) 在存在“死区”时,峰值斯特雷尔比 R_s 和光束质量因子 β 的测量结果均要小于相应实际真实值,此时如果采用 R_s 作为评价参数会低估实际光束的质量,采用 β 值作为评价指标会高估实际光束的质量;对环围能量比 R_{ee} 情况稍有不同,较小的死

区会导致临界点的出现,当远场焦斑峰值分别位于临界点两侧时,采用 R_{ec} 作为评价指标会高估(焦斑峰值小于临界值时)或低估(焦斑峰值大于临界值时)实际光束的质量,随着“死区”逐渐增加,临界点会消失,采用 R_{ec} 的评价指标将始终高估了实际光束的质量;

3) 死区的存在使得光束质量的测量结果较无死区情况更加偏离实际真实值,在 CCD 的线性响应范围内,当实际光强峰值取为 CCD 线性响应区上限时,峰值斯特雷尔比 R_s 、光束 β 值以及 R_{ec} 的测量结果均最靠近实际真实情况,此时,对 R_s 来讲,对于不同湍流强度的远场光斑,要使得 R_s 的测量相对误差控制在 -10% 之内,需控制“死区”的大小使其占 CCD 线性响应区 10% 之内;而为了使光束 β 值和 R_{ec} 的测量相对误差在 10% 之内,对“死区”将提出更为苛刻的限制,即要求其占 CCD 线性响应区上限的百分比需要分别控制在 1% 和 2% 以内,且随着湍流强度的增加,必须更小的死区才能够满足相同的测量精度要求。

CCD 死区的存在使得远场光斑幅度较小的空间分布特征丢失,非线性饱和效应会造成远场光斑幅度较大的中心主核形态被压缩,二者均对远场焦斑测量及光束质量的计算带来不容忽视的影响,为了减小它们的影响,对 CCD 光电响应特性的事先标定并做事后数据的修正以及采用焦斑重构方法以拓展 CCD 测量动态范围这两种方案是十分有效的手段。

参 考 文 献

1 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing,

National Defense Industry Press, 2003. 247~264
 苏毅,万敏.高能激光系统[M].北京:国防工业出版社,2003. 247~264
 2 Li Ende, Duan Haifeng, Yang Zeping *et al.*. Method of calibrating CCD optics-electron characteristic[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2): 227~229
 李恩德,段海峰,杨泽平等.电荷耦合器件光电响应特性标定研究[J].*强激光与粒子束*,2006, **18**(2): 227~229
 3 J. Y. Wang. Phase-compensated optical beam propagation through atmospheric turbulence[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(16): 2580~2590
 4 He Yuanxing, Jiang Wenhan, Li Xinyang. Far-field propagation of focused Gaussian beam through atmospheric turbulence and effects of adaptive phase compensation[J]. *Chinese J. Laser*, 2011, **38**(3): 0312001
 贺元兴,姜文汉,李新阳.聚焦高斯光束在湍流大气中的远场传输及相位补偿效果[J].*中国激光*,2011, **38**(3): 0312001
 5 T. S. Ross, W. P. Latham. Appropriate measures and consistent standard for high-energy laser beam quality[J]. *J. Directed Energy*, 2006, **2**(1): 22~58
 6 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
 冯国英,周寿桓.激光光束质量综合评价的探讨[J].*中国激光*,2009, **36**(7): 1643~1653
 7 R. F. Lutomirski, H. T. Yura. Propagation of a finite optical beam in an inhomogeneous medium[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(7): 1652~1658
 8 D. L. Fried. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1966, **56**(10): 1372~1379
 9 G. C. Holst. CCD Arrays, Cameras, and Displays [M]. Bellingham: SPIE-International Society for Optical Engine, 1996. 164~165
 10 C. W. Laumann, J. L. Miller, C. E. Thompson *et al.*. ICF Quarterly Report, UCRLJC-106786[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1991
 11 He Yuanxing, Li Xinyang. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208001
 贺元兴,李新阳.基于衍射光栅的远场焦斑测量新方法[J].*中国激光*,2012, **39**(2): 0208001

栏目编辑:何卓铭