

文章编号: 0258-7025(2009)06-1420-08

光学系统的 Zernike 像差与光束质量 β 因子的关系

叶红卫 李新阳 鲜浩 饶长辉

(中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209)

摘要 利用波前像差的泽尼克(Zernike)模式分解,分析了光学系统的静态像差和动态像差与系统的光束质量 β 因子间的关系。建立了静态和动态 Zernike 像差系数与 β 间的计算表达式,并用数值计算方法得到了前 65 阶静态和动态 Zernike 像差与 β 间的近似公式拟合系数。在此基础上建立了符合科尔莫哥诺夫(Kolmogorov)大气湍流引起的动态 Zernike 像差与 β 间的对应关系。数值计算结果验证了该分析结论和得到的近似计算公式的正确性。

关键词 激光技术; 泽尼克像差; 拟合系数; 大气湍流

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1420

Relationship between Zernike Wavefront Errors and Beam Quality Factor β for Optics System

Ye Hongwei Li Xinyang Xian Hao Rao Changhui

(Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Decomposed by Zernike polynomials of the wavefront, the relationship between beam quality factor β and static and dynamic aberration are analyzed. The formula between β and Zernike polynomials are obtained. After numerical calculation, the first 65 order fitted coefficients about the formula are offered. The approximate formula corresponding to Kolmogorov atmosphere turbulence is given. These approximate formulas are compared and verified well with the results of numerical calculation.

Key words laser technique; Zernike polynomials; fitted coefficients; atmosphere turbulence

1 引言

在激光大气传输等应用领域中,由于光学系统的波像差和大气湍流等因素会引起光束能量弥散,光束质量下降,因此波前像差与光束质量之间的关系引起人们的关注。光束质量下降的程度可以用光束质量 β 因子反映^[1~9]。泽尼克(Zernike)多项式容易与波前像差建立起联系,因此经常使用 Zernike 多项式来表征波前像差和大气湍流的影响。一般认为 Zernike 模式阶数越高的像差对光束质量影响越大,长期以来人们对 Zernike 模式像差对 β 影响未能建立起统一的认识。鲜浩等^[2]研究了波像差和 β 的关系,通过对不同类型 Zernike 像差及其组合的均方根值 σ 和 β 进行数值计算和二阶多项式拟合。李新

阳等^[3]进一步研究了波像差和 β 的关系,得出光学系统总的 β 与各部分像差引起的 β 间存在平方和关系的重要结论,并用数值计算得到各阶 Zernike 像差系数与 β 关系的表达式。但上述研究都是关于静态像差的,并没有考虑到动态波像差对 β 的影响。例如大气湍流中各种像差是随时间变化的,与静态像差相比,动态像差对长时间曝光的远场光斑光束质量的影响更加严重^[8,9]。例如随机倾斜像差对单帧远场光斑的形态无影响,但是随机倾斜造成长曝光光斑的扩展和模糊,对长曝光光斑光束质量影响很大。叶红卫等^[4]分析了光斑漂移误差对长曝光光斑 β 的影响。光斑漂移误差其实就是第 1,2 阶整体倾斜 Zernike 像差。但对于其余高阶 Zernike 像差的静态与动态分布

收稿日期: 2008-07-17; 收到修改稿日期: 2008-09-16

作者简介: 叶红卫(1972—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事自适应光学、大气光学等方面的理论和应用研究。

E-mail: YHW0310@126.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学、大气光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

对长曝光光斑光束质量的影响,还没有定量的理论分析结果报道,也没有可用的经验公式。

本文详细分析了静态和动态波前像差对光束质量的综合影响,并在此基础上分析了光学系统同时受到静态像差与动态大气湍流随机像差影响情况下,动态 Zernike 系数与长曝光光斑光束质量 β 因子间的关系等问题。

2 Zernike 波像差与光束质量 β 因子的关系

2.1 Zernike 波像差的定义

$$\left. \begin{aligned} Z_q &= (n+1)^{1/2} R_n^0(\rho) & m &= 0 \\ Z_q &= [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \cos(m\theta), & q &= 2j \\ Z_q &= [2(n+1)]^{1/2} R_n^m(\rho) \sin(m\theta), & q &= 2j-1 \end{aligned} \right\} \quad m \neq 0$$

$$j = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

式中 n 和 m 为整数,并满足关系 $n-m=2p$, $p=0, 1, 2, \dots, q$ 是模序数,且为 n 和 m 的函数,径向多项式 R_n^m 定义为

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s}.$$

2.2 光束质量 β 因子的定义

由于光束远场光斑强度分布的横向尺度受到衍射极限的限制,一般用理想光束的远场光斑半径和实际光束的远场光斑半径的比值定义为光束质量 β 因子,习惯上称 β 因子为衍射极限倍数,用公式表示为^[1~6]

$$\beta = \frac{R}{1.22\lambda \cdot f/D}. \quad (3)$$

常认为理想光束的远场光斑的一级暗环半径为光斑半径,内部包含的能量约为总能量的 83.8%。以包含实际光束的远场光斑总能量的 83.8% 能量的半径(单位: $1.22\lambda \cdot f/D$)来评价实际光束的光束质量。在计算 β 时,通常以光斑的质心位置作为环围能量计算的圆心。

2.3 Zernike 像差与 β 的关系

在光学系统的设计和分析中,经常需要知道 Zernike 波像差大小与光束质量 β 因子的关系。但 Zernike 波像差与 β 之间的关系比较复杂,很难得到准确的解析结果。李新阳等^[3]研究了静态 Zernike 波像差波面均方根值 σ 和 β 的关系。通过从光学理论上分析波像差对远场光斑扩展度的影响,得到各

在圆形孔径内,一个完整的波前相位可以用一组 Zernike 多项式来描述^[10~13]

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k Z_k(x, y) + \epsilon, \quad (1)$$

式中 a_k 为第 k 项 Zernike 多项式系数, Z_k 为第 k 项 Zernike 多项式, ϵ 为相位复原误差,通过设定不同 Zernike 多项式系数 a_k 可以得到一个圆域内的波前相位。Zernike 多项式通常在圆域上定义,是互为正交、线性无关的。Zernike 多项式可以用 $r^n \cos(m\theta)$ 和 $r^n \sin(m\theta)$ 的形式表示,以半径 ρ 和方位角 θ 定义的极坐标形式表示的多项式为

阶 Zernike 像差与 β 的关系

$$\beta_{Si}^2 = 1 + (k_{Si}\sigma_i)^2, \quad (4)$$

k_{Si} 为各阶 Zernike 像差静态拟合系数, σ_i 为各阶静态 Zernike 像差的均方根值。

对于包含多阶正交像差的组合像差而言,则有^[3]

$$\beta_s^2 = 1 + \sum (\beta_{Si}^2 - 1) = 1 + \sum (k_{Si}\sigma_i)^2. \quad (5)$$

(5)式给出了各阶静态 Zernike 像差与 β 之间的关系,数值仿真结果与理论分析符合得很好,在实际工作中也得到了验证。

文献^[3]的工作证明:各阶正交的 Zernike 像差对光束质量因子 β 的影响是相互独立的,这是一个重要结论。但文献^[3]仅仅针对静态 Zernike 组合像差的情况进行了研究,并给出了各阶 Zernike 像差的公式(5)中的拟合系数。在实际工作中,由于大气湍流或周围环境的影响,实际系统的像差中既有光学加工、装配等固定存在的静态像差部分,又有大气湍流等造成的动态随机像差部分。根据统计光学理论,大气湍流造成的动态像差是一组特定的零均值的 Zernike 像差组合^[10~15],反映到 Zernike 系数分解上,像差的各阶 Zernike 系数是以服从正态分布的形式存在的。如果在实际测量中采用多次测量取平均的方法则会忽略动态像差对测量结果造成的影响。但是动态像差是实际存在的,对长曝光光斑的光束质量影响也很大。而各阶 Zernike 像差系数动态误差 δ_i 与长曝光光斑的 β 之间的关系没有明

确的研究结论。

为此,将各阶 Zernike 像差对光学系统光束质量影响的问题分为两种情况,以 Zernike 像差系数均值 σ_i 表示的静态像差部分对光束质量的影响,以及以 Zernike 像差系数标准差 δ_i 表示的动态像差部分(例如大气湍流造成的零均值组合像差)对光束质量的影响。仍然采用文献[3]的分析方法和结论,认为各阶 Zernike 像差动态误差 δ_i 对 β 的影响相互独立,动态 Zernike 像差与长曝光光斑的 β 因子的关系也服从

$$\beta_{D_i}^2 = 1 + (k_{D_i}\delta_i)^2, \quad (6)$$

式中 k_{D_i} 为各阶 Zernike 像差动态拟合系数, δ_i 为各阶动态 Zernike 像差的均方根(RMS)值。对于组合动态像差情况则有

$$\beta_D^2 = 1 + \sum (\beta_{D_i}^2 - 1) = 1 + \sum (k_{D_i}\delta_i)^2, \quad (7)$$

同时认为静态和动态 Zernike 像差对 β 的影响也是相互独立的。

$$\beta^2 = 1 + (\beta_S^2 - 1) + (\beta_D^2 - 1), \quad (8)$$

式中 β_S 为静态 Zernike 像差下的 β 因子, β_D 为动态 Zernike 像差下的 β 因子。综合以上分析结果,对于同时存在静态和动态 Zernike 像差的光学系统,各阶像差服从 $N(\sigma_i, \delta_i^2)$ 分布,其长曝光光斑 β 可以假设为

$$\beta^2 = 1 + \sum (k_{S_i}\sigma_i)^2 + \sum (k_{D_i}\delta_i)^2, \quad (9)$$

式中 k_{S_i} 为第 i 阶静态像差对应的拟合系数, k_{D_i} 为第 i 阶动态像差对应的拟合系数。以下将用数值仿真

对这个公式进行检验,给出具体的拟合系数,并针对大气湍流畸变像差得到一些有用的推论。

3 数值计算结果

3.1 静态 Zernike 像差与 β 的关系

首先假设动态 Zernike 像差系数标准差 δ_i 为 0,即单次瞬态情况下研究 Zernike 像差系数均值 σ_i 与 β 的关系,在仿真计算中,依次分别设置 3~65 阶 Zernike 多项式系数由零到大渐变,产生一系列波前相位分布。对波面相位利用快速傅里叶变换(FFT)计算出对应的远场光强分布,波前计算网格为 256×256 ,FFT 计算网格为 1280×1280 ,仿真理想平面波前的远场艾里光斑的光束质量为 $\beta=1.001$,因此认为这种网格密度条件下对光束质量的计算是可信的。计算出该远场光斑的 β 因子,并根据(4)式得到了静态 3~65 阶 Zernike 像差系数对应的静态系数 k_{S_i} 。由于整体倾斜项(第 1 阶和第 2 阶 Zernike 像差)对单帧远场光斑光束质量无影响,在此不需要考虑。并且具有相同的径向和角向空间频率仅方向不同的那些 Zernike 项的拟合系数相同。计算结果如表 1 和图 1 中静态拟合系数所示,同时给出了文献[3]的相关拟合结果。可见前 35 阶的 Zernike 静态像差的拟合系数与文献[3]基本相同,但有一定差异。这是由于本计算网格等计算条件更精细,所以拟合系数结果更准确。另外还给出了更高阶直到前 65 阶的拟合系数。

表 1 各阶 Zernike 多项式对应的 β 因子拟合系数

Table 1 Fitting coefficients of beam quality factor β for Zernike polynomials

Radial frequency n	Azimuth frequency m	Zernike order i	Fitted reference 3	Fitted coefficients k_{S_i}	Fitted coefficients k_{D_i}
1	± 1	1,2	/	/	4.4
2	0	3	10.3	10.7	11.5
2	± 2	4,5	7.4	7.2	8.3
3	± 1	6,7	14.7	14.3	14.8
3	± 3	8,9	11.4	11.4	11.4
4	0	10	26.5	27.3	19.8
4	± 2	11,12	22.6	22.5	17.6
4	± 4	13,14	15.5	15.7	14.2
5	± 1	15,16	24.2	23.3	21
5	± 3	17,18	26	25.6	20.3
5	± 5	19,20	19.6	19.9	16.5
6	0	21	31.3	27.5	26.8
6	± 2	22,23	25	24.1	23.8
6	± 4	24,25	28.1	27.7	23.3
6	± 6	26,27	23.4	23.8	18
7	± 1	28,29	31.5	27.5	28
7	± 3	30,31	27.1	25.9	26.5
7	± 5	32,33	29.4	27.5	25.9
7	± 7	34,35	26.9	26.9	20
8	0	36	/	29.2	33.8
8	± 2	37,38	/	30.3	30.2

(续表 1)

8	± 4	39.40	/	27.6	29.6
8	± 6	41.42	/	26.6	28
8	± 8	43.44	/	29.9	21.5
9	± 1	45.46	/	34.1	32.5
9	± 3	47.48	/	32.1	33.7
9	± 5	49.50	/	31.2	33.5
9	± 7	51.52	/	28.9	30.5
9	± 9	53.54	/	32.4	22.5
10	0	55	/	39.2	40.6
10	± 2	56.57	/	35.8	37.2
10	± 4	58.59	/	34.5	35.8
10	± 6	60.61	/	33.2	35.7
10	± 8	62.63	/	31.9	32.2
10	± 10	64.65	/	34.1	22.7

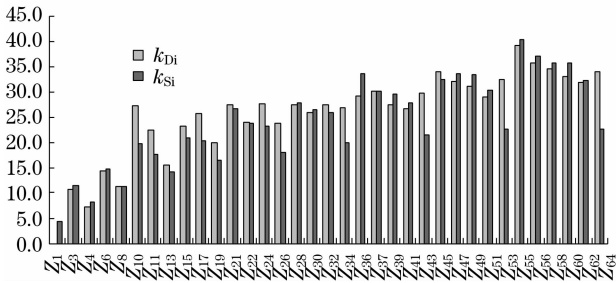


图 1 各阶 Zernike 系数对应的光束质量 β 因子拟合系数 k_{Di} 和 k_{Si}

Fig. 1 Fitting coefficients k_{Di} and k_{Si} of beam quality factor β for Zernike index

3.2 动态 Zernike 像差与 β 的关系

依次分别设置 1~65 阶 Zernike 多项式系数服

从零均值正态分布 $N(0, \sigma_s^2)$, 产生多帧的波前相位分布。对波前相位利用 FFT 计算出对应的远场光强分布, 波前计算网格为 256×256 , FFT 计算网格为 1024×1024 。计算出对应的远场光强分布。然后用多帧远场光斑平均后作长曝光光斑进行 β 计算, 根据(6)式得到了各项 Zernike 像差标准差 δ_i 对应的系数 k_{Di} , 给出第 3 阶, 4 阶, 10 阶, 21 阶典型 Zernike 像差的计算结果, 如图 2 所示。其中 $\sigma_s = 0$ 是仅存在动态像差的结果, $\sigma_s = 0.5$ 和 $\sigma_s = 1$ 是动态像差及静态像差与动态像差相结合情况下的计算结果。图中星点为 FFT 仿真计算结果, 实线为用(6)式和(9)式拟合结果。可见拟合(6), (9)式与仿真结果吻合得很好。动态拟合系数如表 1 和图 1 所示。

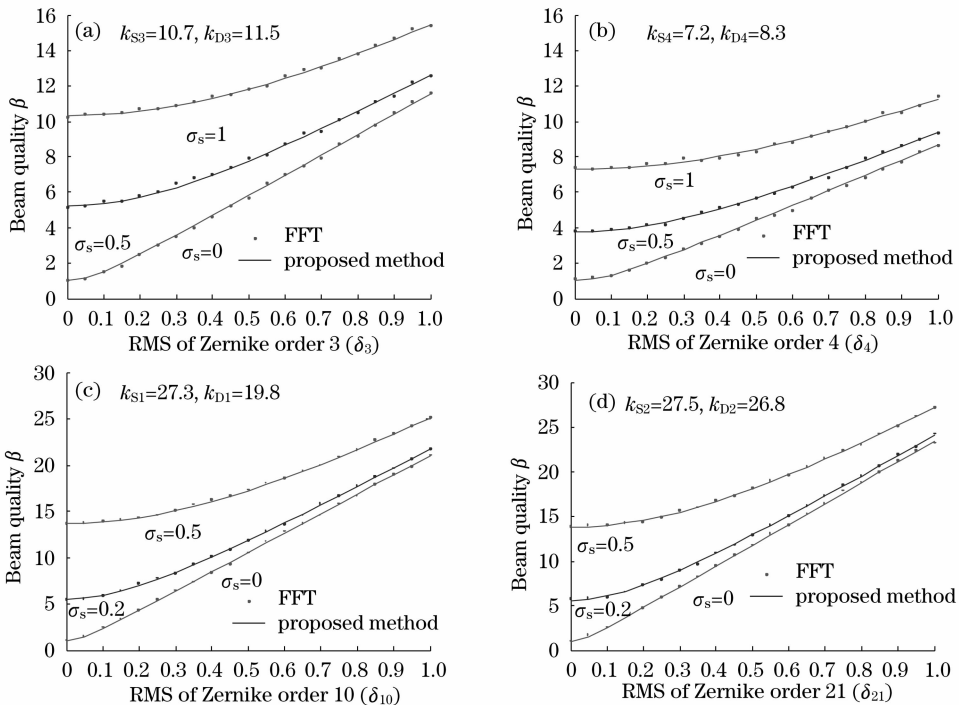


图 2 典型 Zernike 像差光束质量 β 因子与 Zernike 像差的关系

Fig. 2 Relationship between beam quality factor β and Zernike polynomials coefficient

叶红卫等^[4]专门讨论了随机倾斜角误差对长曝光光斑光束质量的影响,在 x, y 方向上随机倾斜角相同的情况下,认为当倾斜角以 λ/D 为单位时, β 因子与倾斜角误差的关系为

$$\beta_{\text{r}}^2 = \beta_0^2 + (1.56 \times \delta)^2, \quad (10)$$

其中 β_0 为无倾斜角误差时的光束质量 β 因子, δ 为以 λ/D 为单位时两个正交方向上的倾斜角标准差。如果把倾斜角度换算到第 1, 2 阶 Zernike 系数, 则推导得到(6)式中第 1, 2 阶 Zernike 像差的拟合系数应为 $1.56 \times 2\sqrt{2} = 4.41$, 这与本文拟合系数计算结果一致。

由图 2 可以看出, 静态和动态的拟合系数都随着 Zernike 像差阶数的增加而变大, 这意味着同样大小的高阶 Zernike 误差比低阶 Zernike 误差对 β 的影响要大。尤其是如 10, 21, 36, 55 等球差项像差类的个别高阶像差, 比其阶数附近的像差对 β 的影响大。换言之, 如果两个光学系统的像差大小相同, 但高低阶 Zernike 模式分布不同, 一个以高阶像差为主, 一个以低阶像差为主, 那么以高阶为主的那个光学系统的 β 因子将比后者大。这个现象在实际工作中经常遇到, 但缺乏定量的研究手段。上述分析方法和结论, 为这个高阶像差和低阶像差匹配问题的定量研究提供了一种技术途径。

3.3 大气湍流对光束质量的影响

大气湍流引起的波前像差畸变是一种典型的零均值 Zernike 组合像差, 对于符合科尔莫哥诺夫(Kolmogorov)功率谱统计规律的大气湍流, 各阶 Zernike 像差的方差分布如表 2 所示。大气湍流造成波像差的总方差可以表示为各阶 Zernike 像差的方差和形式^[7~11]

$$\delta^2 = \sum C_J \times (D/r_0)^{5/3}, \quad (11)$$

其中 C_J 为第 J 阶 Zernike 像差的方差, D 为光学系统直径, r_0 为大气相干长度。在包含整体倾斜时科尔莫哥诺夫大气湍流造成的波像差的总方差为

$$\delta_{\text{with_tilt}}^2 \approx 1.0299(D/r_0)^{5/3}. \quad (12)$$

不考虑整体倾斜时, 科尔莫哥诺夫大气湍流造成的波像差的方差为

$$\delta_{\text{no_tilt}}^2 \approx 0.134(D/r_0)^{5/3}. \quad (13)$$

这里波像差方差 δ 的单位是相位弧度平方, 1 波长等于 2π 相位弧度, 与具有相同的径向空间频率的那些 Zernike 项的拟合系数相同。

大气湍流畸变造成的光束质量 β 因子下降与各阶 Zernike 像差引起的光束质量变化的加权和有

表 2 科尔莫哥诺夫大气湍流中各阶 Zernike 多项式的方差分布

Table 2 Variances of Zernike polynomials in atmosphere turbulence with Kolmogorov spectrum

Radial frequency n	Azimuth frequency m	Zernike order i	Variances $C_k \times (D/r_0)^{5/3}$
1	± 1	1,2	4.49×10^{-1}
2	0	3	2.303×10^{-2}
2	± 2	4,5	
3	± 1	6,7	6.180×10^{-3}
3	± 3	8,9	
4	0	10	
4	± 2	11,12	2.376×10^{-3}
4	± 4	13,14	
5	± 1	15,16	
5	± 3	17,18	1.189×10^{-3}
5	± 5	19,20	
6	0	21	
6	± 2	22,23	6.641×10^{-4}
6	± 4	24,25	
6	± 6	26,27	
7	± 1	28,29	
7	± 3	30,31	4.017×10^{-4}
7	± 5	32,33	
7	± 7	34,35	
8	0	36	
8	± 2	37,38	
8	± 4	39,40	2.581×10^{-4}
8	± 6	41,42	
8	± 8	43,44	
9	± 1	45,46	
9	± 3	47,48	
9	± 5	49,50	1.738×10^{-4}
9	± 7	51,52	
9	± 9	53,54	
10	0	55	
10	± 2	56,57	
10	± 4	58,59	1.216×10^{-4}
10	± 6	60,61	
10	± 8	62,63	
10	± 10	64,65	

关。对于符合科尔莫哥诺夫功率谱统计规律的大气湍流,可以通过将各阶 Zernike 像差的动态像差拟合系数 k_{Di} 乘以其在大气湍流畸变像差中的方差分布系数 C_{ki} ,并转换到波长单位,求和后可以得到理想无固定像差光斑经大气湍流后的畸变波前大小与长曝光光斑光束质量 β 因子的关系。包含整体倾斜时的大气湍流与光束质量 β 因子关系为

$$\beta^2 = 1 + C_T(D/r_0)^{5/3}, \quad (14)$$

其中

$$C_T \approx \sum_{i=1}^{64} C_{ki} \cdot \left(\frac{k_{Di}}{2\pi}\right)^2. \quad (15)$$

在不考虑整体倾斜时,3~64 阶 Zernike 像差组成的大气湍流畸变与光束质量 β 因子的近似关系式为

$$\beta^2 = 1 + C(D/r_0)^{5/3}, \quad (16)$$

其中

$$C \approx \sum_{i=3}^{64} C_{ki} \cdot \left(\frac{k_{Di}}{2\pi}\right)^2. \quad (17)$$

通过计算动态像差拟合系数 k_{Di} 与大气湍流畸变像差中的方差分布系数 C_{ki} 乘积得出 $C_T = 1.11$, $C = 0.66$ 。文献[3]中得到不考虑整体倾斜时,3~36 阶 Zernike 像差组成的大气湍流畸变与光束质量 β 因子的近似关系式

$$\beta^2 = 1 + 0.62(D/r_0)^{5/3}. \quad (18)$$

(18)式是通过将各阶 Zernike 静态像差的拟合系数 k_{si} 乘以其在大气湍流中的像差方差分布系数 C_k 求和后得到的。文献[3]的物理概念和计算方法是错误的,大气湍流畸变波前是一组零均值正态随机分布动态像差,应该用动态像差拟合系数 k_{Di} 去计算才正确。静态像差和动态像差对 β 因子的影响程度是不同的。

对于同时存在静态像差和动态像差的情况,如

果静态像差造成的光束质量因子为 β_0 ,经大气湍流畸变波前的方差 δ (单位: λ)与 β 的关系,包含整体倾斜时的大气湍流与 β 的关系为

$$\beta^2 = \beta_0^2 + C_T(D/r_0)^{5/3}. \quad (19)$$

在不考虑整体倾斜时,3~64 阶 Zernike 像差组成的大气湍流畸变与光束质量 β 因子的近似关系式为

$$\beta^2 = \beta_0^2 + C(D/r_0)^{5/3}, \quad (20)$$

按照表 1 的 Zernike 多项式像差分布产生一组用 Zernike 多项式表示的大气湍流畸变波前序列共 1000 帧,同时随机生成一组固定像差,固定像差对应的远场光斑如图 3 所示,光束质量 β 因子分别为 4.2,5.1 和 6.1。用 FFT 方法计算出同时包含静态像差和大气湍流动态像差的波前对应的远场光斑,用约 1000 帧远场光斑的平均长曝光光斑,计算出长曝光光斑的光束质量 β 因子,并与用(19)式和(20)式得到的拟合结果对比。其中在大气湍流强度为 $D/r_0 = 10$ 条件下,不包含和包含整体倾斜情况下的长曝光光斑分别如图 4,图 5 所示。长曝光光斑光束质量 β 因子随大气湍流 D/r_0 变化的结果如图 6 所示。其中 * 是仿真计算结果,曲线是用(19)式和(20)式得到的拟合结果。可见在包含和不包含整体倾斜、包含和不包含静态像差情况下,用本文拟合公式与各种条件下仿真结果在相当大的像差范围内是准确的。需要指出的是,在包含整体倾斜和不包含整体倾斜的情况下,拟合出的最佳系数为 $C_T = 1.2$, $C = 0.7$,这与之前系数加权和结果 $C_T = 1.1$, $C = 0.66$ 有一定误差。这种情况是由于按系数加权和计算得到的拟合系数 C_T , C 并没有考虑 64 阶以上高阶像差的影响,因此认为仿真得到的拟合系数 $C_T = 1.2$, $C = 0.7$ 更为准确。

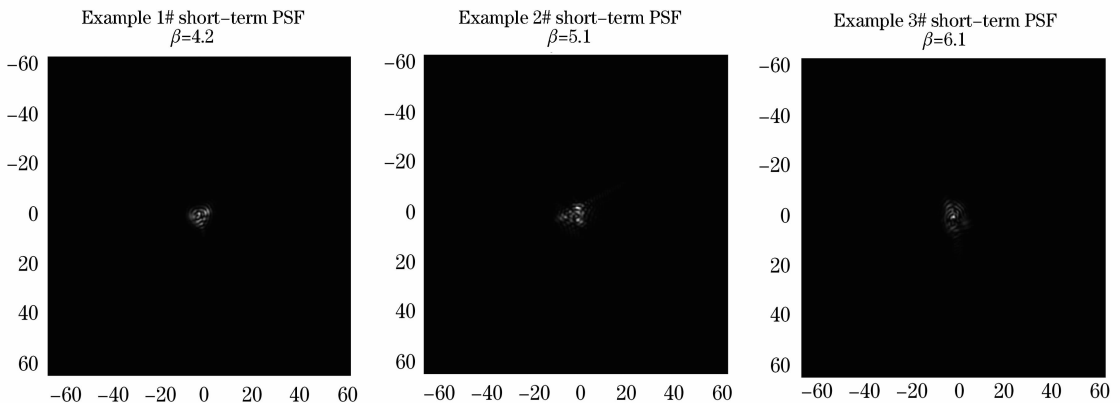


图 3 静态像差远场光斑

Fig. 3 Short-term exposure spot with static wavefront error

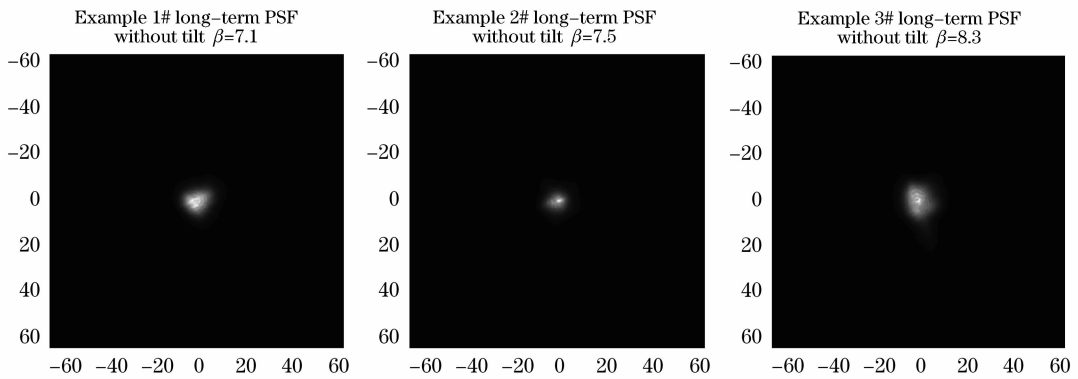


图 4 不含倾斜像差时的长曝光光斑

Fig. 4 Long-term exposure spot without tilt

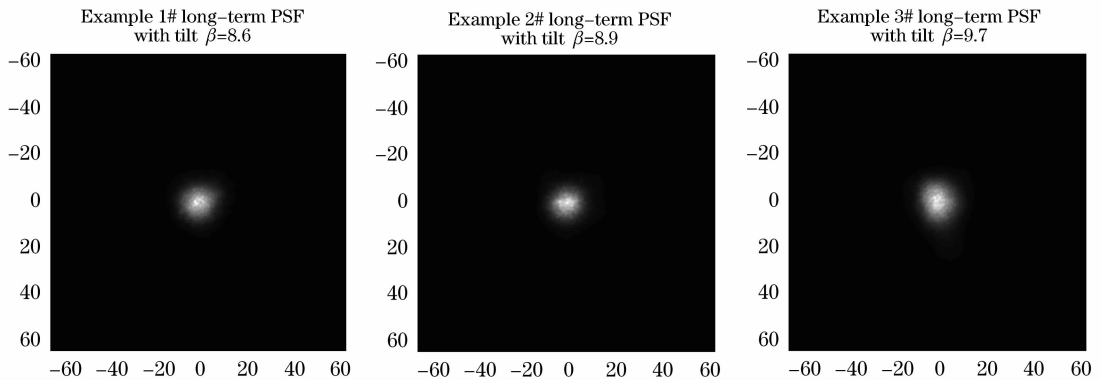


图 5 包含倾斜像差时的长曝光光斑

Fig. 5 Long-term exposure spot with tilt

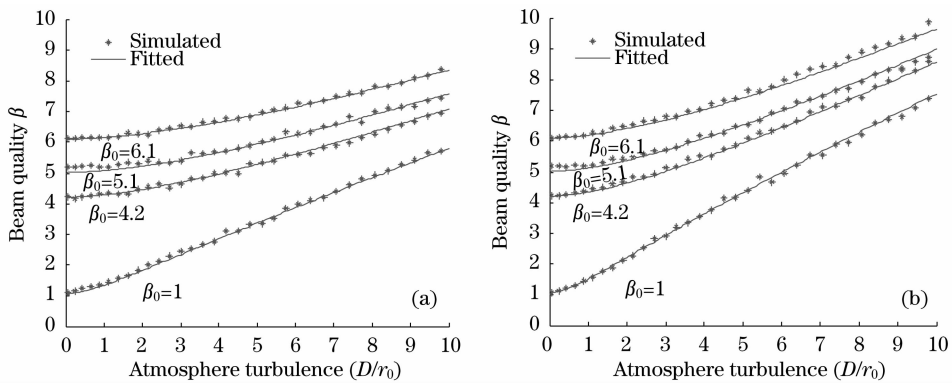


图 6 大气湍流与光束质量 β 因子的关系。(a)不含倾斜像差;(b)包含倾斜像差

Fig. 6 Relationship between beam quality factor β and atmosphere turbulence. (a) without tilt; (b) with tilt

在实心圆口径条件下,采用 83.8% 环围能量定义的光束质量 β 因子基础上展开研究的,如果光束非圆孔径,或孔径上存在遮拦,或采用其他的光束质量 β 因子定义方式,得到的拟合系数会与本文不同,但都可以用本文方法得到类似的结论。例如对于空心遮拦为 1/3 的环形光束而言,一倍衍射极限半径为 $1.0977(\lambda f/d)$,一倍衍射极限半径内包含总能量的 65.4%,大气湍流畸变与光束质量 β 因子的关系式中无倾斜影响时拟合系数 $C=0.4$,有倾斜影响时

拟合系数 $C=0.8$ 。利用文献[2~4],以及本文结果,为研究各种条件下的波像差与光束质量 β 因子的关系建立了一套较全面的理论体系,对实际工作有较大的指导意义。

4 结 论

分析了光学系统的静态和动态 Zernike 像差与对应的光束质量 β 因子间的关系,推导了根据波像差的 Zernike 系数和动态方差估算 β 的计算公式。

用 FFT 数值计算方法建立了各种 Zernike 多项式的波像差均方根值与 β 因子间的拟合关系式,并在此基础上建立了科尔莫哥诺夫大气湍流引起的波像差与对应 β 因子间的拟合关系式。数值计算结果验证了本文拟合公式在较大的像差范围内都是成立的。

不同阶 Zernike 像差对 β 因子影响的差异很大,Zernike 像差随着阶数增加对 β 因子的影响越大,对于个别像差项如 10,21,36,55 阶球差项像差对 β 因子的影响较大。自适应光学系统设计不当,就会在校正低阶像差时产生较大的高阶残余像差,影响最终的校正效果。因此在自适应光学系统工作时,既要注意低阶像差校正,又要注意高阶残余对光束质量的影响,才能得到理想的校正效果。

参 考 文 献

- Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 327~332
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光, 1997, **A24**(4): 327~332
- Xian Hao, Jiang Wenhan. The relation between wavefront aberration and beam quality factor[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(5): 415~419
鲜 浩,姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系[J]. 中国激光, 1999, **A26**(5): 415~419
- Li Xinyang, Xian Hao, Wang Chunhong *et al.*. The relationship between beam quality factor β and wavefront error[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 798~802
李新阳,鲜 浩,王春鸿等. 波像差与光束质量 β 因子关系研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 798~802
- Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao *et al.*. Relationship between the beam excursion error and the beam quality factor β factor of long-term exposure spot[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 809~813
叶红卫,李新阳,鲜 浩等. 光束漂移误差与长曝光光斑光束质量 β 因子的关系[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 809~813
- Jiang Shaoen, Sun Jinwen. The effect of light beam quality β factor on thermal blooming[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1993, **20**(3): 1~5
江少恩,孙景文. 光束质量 β 因子对热晕的影响[J]. 光电工程, 1993, **20**(3): 1~5
- Wei Jifeng, Zhang Kai, Qian Shaosheng *et al.*. Evaluation of uncertainty in online energy measurement of high energy laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7): 1103~1106
魏继锋,张 凯,钱绍圣等. 高能激光能量在线测试中的不确定度分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7): 1103~1106
- Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3): 193~196
刘泽金,陆启生,赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. 中国激光, 1998, **A25**(3): 193~196
- Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004
苏 毅,万 敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- Lü Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 47~51
吕百达,康小平. 对激光光束质量一些问题的认识[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(1): 47~51
- Hu Chaohui, Jiang Wenhan. Simulation of the optical wavefront distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(2): 50~56
胡朝晖,姜文汉. 受大气湍流影响的光学波前模拟[J]. 光电工程, 1995, **22**(2): 50~56
- Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Temporal power spectra analysis of low-order modes of atmospheric turbulence wavefront[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1224~1230
饶长辉,姜文汉,凌 宁. 大气湍流波前低阶模式的时间功率谱分析[J]. 光学学报, 1999, **19**(9): 1224~1230
- R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(8): 1065~1072
- N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(10): 1174~1180
- J. W. Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes[M]. New York: Oxford University Press. 1998. 104~134
- F. G. Smith. Atmospheric Propagation of Radiation [M]. Washington: Gary Golnic, 1993. 220~224