

波前畸变对大口径光束相干合成中光束指向探测的影响

母 杰^{1,2}, 周凯南^{1,2}, 王 逍^{1,2*}, 左言磊^{1,2}, 曾小明^{1,2}, 王晓东^{1,2}, 谢 娜^{1,2},
周 松^{1,2}, 李志林^{1,2,3}, 赵 丹^{1,2}, 朱启华^{1,2}, 粟敬钦^{1,2}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240;

³西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054

摘要 为了研究波前畸变对光束指向探测的影响, 采用蒙特卡罗方法分别在整口径和不同口径、不同排布的子口径情况下, 对光束进行了模拟分析。研究表明, 当波前畸变的均方根值小于 0.163λ 时, 光束指向探测误差小于 $0.5 \mu\text{rad}$; 当波前畸变的均方根值小于 0.234λ 时, 光束指向探测误差小于 $1 \mu\text{rad}$ 。可选取波前畸变相对较小的子光束区域来计算整口径的光束指向。

关键词 激光技术; 相干合成; 蒙特卡罗方法; 光束指向探测; 波前畸变

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0605001

Effect of Wavefront Distortion on Beam Pointing Detection in Coherent Combination of Large Aperture Beams

Mu Jie^{1,2}, Zhou Kainan^{1,2}, Wang Xiao^{1,2}, Zuo Yanlei^{1,2}, Zeng Xiaoming^{1,2},
Wang Xiaodong^{1,2}, Xie Na^{1,2}, Zhou Song^{1,2}, Li Zhilin^{1,2,3}, Zhao Dan^{1,2},
Zhu Qihua^{1,2}, Su Jingqin^{1,2}

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

³State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract In order to study the effect of wavefront distortion on the beam pointing detection, the simulation analysis of beams is done with Monte Carlo method under the conditions of entire aperture and sub-apertures with different sizes and arrangements. The study results show that, when the root-mean-square of wavefront distortion is less than 0.163λ , the beam pointing detection error is under $0.5 \mu\text{rad}$. When the root-mean-square of the wavefront distortion is less than 0.234λ , the beam pointing detection error is under $1 \mu\text{rad}$. Sub-beam areas with relatively low wavefront distortion are suitable for calculating the beam pointing of an entire aperture.

Key words laser technique; coherent combination; Monte Carlo method; beam pointing detection; wavefront distortion

OCIS codes 140.3298; 220.1000; 140.3460

1 引 言

超强激光可以在实验室内创造出高功率密度、强电磁场等极端的物态条件, 因而在等离子体物理^[1]、天

收稿日期: 2017-01-03; 收到修改稿日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61505188)

作者简介: 母 杰(1987—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事固体激光器相干组束方面的研究。

E-mail: mujiebest@163.com

* 通信联系人。E-mail: wangxiaocn@263.net

体物理^[2-3]、核物理^[4-5]等前沿科学领域有着重要的应用价值。受抽运技术、非线性效应、元件损伤等因素的影响,单路激光器的输出通常是有限的,因而已经不能满足越来越高的应用需求。多光束的相干合成是一种提升系统输出能力的重要方法^[6]。

相干合成需要多路激光束聚焦于同一目标点,光束的指向应被严格控制,因此束间指向误差是影响多光束相干合成的关键因素之一^[7-9]。为实现多路光束在靶点处的相干合成,需要在相干合成系统中搭建监测光路,以实时探测并控制激光束的束间误差;为获取高能量,激光装置中通常采用大口径光束。由于装置庞大、结构复杂,诸多因素(如光学元件的面型加工误差、放大器的热畸变、强激光的非线性效应等)都会导致光束的波前畸变,且光束的传输路径不同,因此经过合成光路和监测光路后,光束的波前畸变通常不一致。大口径光束进行相干合成时,波前畸变不仅会影响光束质量^[10-11],降低远场焦斑的能量集中度,还会影响光束指向探测,影响相干合成结果。为研究波前畸变对光束指向探测的影响,本文采用蒙特卡罗方法,在整口径和不同口径、不同排布的子口径情况下,进行了光束指向探测的模拟分析,为大口径光束相干合成中的波前畸变控制提供参考。

2 波前畸变对光束指向探测的影响

泽尼克多项式在圆域上完备正交,因此波前畸变 $\Phi(x, y)$ 可描述为一系列泽尼克多项式的线性组合^[12]:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^{N_s} a_i Z_i(x, y), \quad (1)$$

式中 x, y 为空间归一化坐标, N_s 为泽尼克多项式的阶数, a_i 为第 i 阶泽尼克多项式系数, Z_i 为第 i 阶泽尼克多项式(本文不考虑波前平移影响,以波前倾斜为第一项开始排列)。

根据(1)式,光束在 x 和 y 方向上的斜率 G_x 和 G_y 可以表示为

$$\begin{cases} G_x = \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} = 2a_1 + \frac{\partial \sum_{i=3}^{N_s} a_i Z_i(x, y)}{\partial x} \\ G_y = \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} = 2a_2 + \frac{\partial \sum_{i=3}^{N_s} a_i Z_i(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可知,当 $a_i = 0 (i = 3, \dots, N_s)$ 时, G_x 和 G_y 分别为真实的倾斜量;当 $a_i \neq 0 (i = 3, \dots, N_s)$ 时, $\frac{\partial \sum_{i=3}^{N_s} a_i Z_i(x, y)}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial \sum_{i=3}^{N_s} a_i Z_i(x, y)}{\partial y}$ 也不为0,该波前畸变会引入一个附加的倾斜量,因此波前畸变会影响光束指向探测。

由几何光学可知,光束指向可由远场焦斑位置的变化计算得到。图1和图2分别给出了三种情况下的近场波前和远场焦斑。采用一阶矩算法计算远场焦斑质心,根据图2(c)计算,得到光束在 x 和 y 方向上的倾斜量分别为 $1.81 \mu\text{rad}$ 和 $2.16 \mu\text{rad}$ 。可以看出,当光束存在倾斜时,远场焦斑的位置会发生相应移动。若存在波前畸变,则远场焦斑的形态与无波前畸变时的相比有所退化,光强会重新排列,这会影响远场焦斑质心的计算,从而干扰光束指向的确定。

采用蒙特卡罗方法,以 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的光束为例,分别针对整口径和不同口径、不同排布的子口径

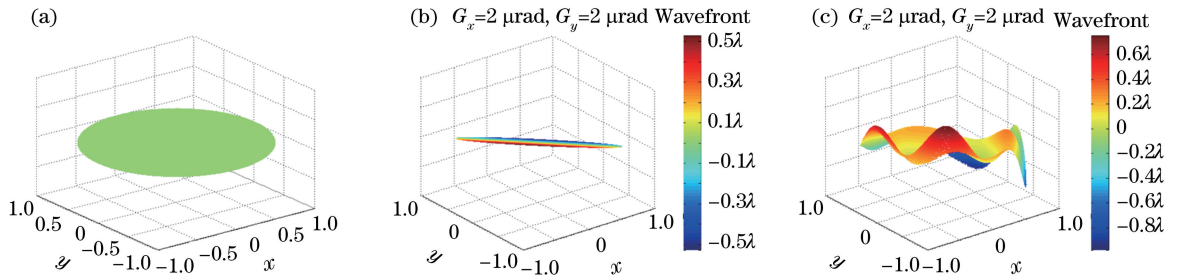


图1 光束近场波前。(a)无倾斜和波前畸变;(b)存在倾斜;(c)存在倾斜和波前畸变

Fig. 1 Near field wavefronts of beams. (a) Without tilt and wavefront distortion; (b) with tilt; (c) with tilt and wavefront distortion

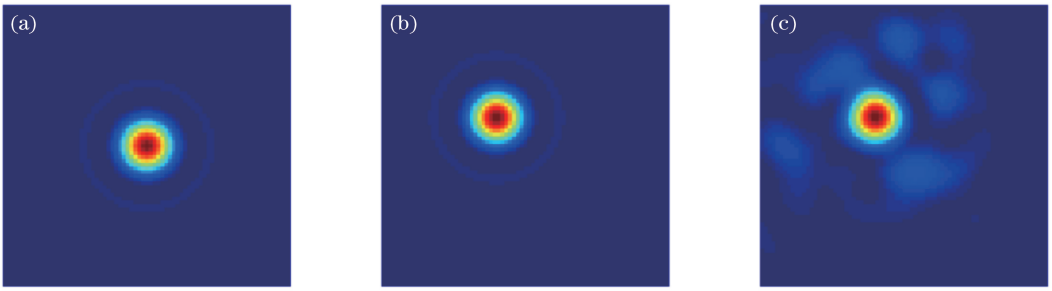


图 2 光束远场焦斑。(a) 无倾斜和波前畸变; (b) 存在倾斜; (c) 存在倾斜和波前畸变
 Fig. 2 Far field focal spots of beams. (a) Without tilt and wavefront distortion; (b) with tilt; (c) with tilt and wavefront distortion

情况,生成波前畸变样本,通过改变波前畸变的幅值,分析波前畸变对光束指向探测的影响。其中,样本服从均值为 0 的正态分布,统计次数取 1000。

2.1 以整口径光束为对象进行计算

指向探测误差与光束波前畸变的关系如图 3 所示,其中 RMS 为均方根值。从图中可以看出,随着波前畸变的增加,光束指向探测误差总体呈上升趋势;当波前畸变的 RMS 小于 0.163λ (λ 为波长) 时,由波前畸变引起的光束指向探测误差小于 $0.5 \mu\text{rad}$,当波前畸变的 RMS 小于 0.234λ 时,光束指向探测误差小于 $1 \mu\text{rad}$ 。因此,根据光束指向的探测精度需求可得到波前畸变的控制范围,从而指导光束的质量优化。此外,当波前畸变一定时,其引起的光束指向探测误差是一定的,在系统实际工作时,可以标出静态波前畸变带来的探测误差;对于动态波前畸变,其带来的探测误差不确定,但是可以通过控制光束质量、减小波前畸变来降低探测误差。

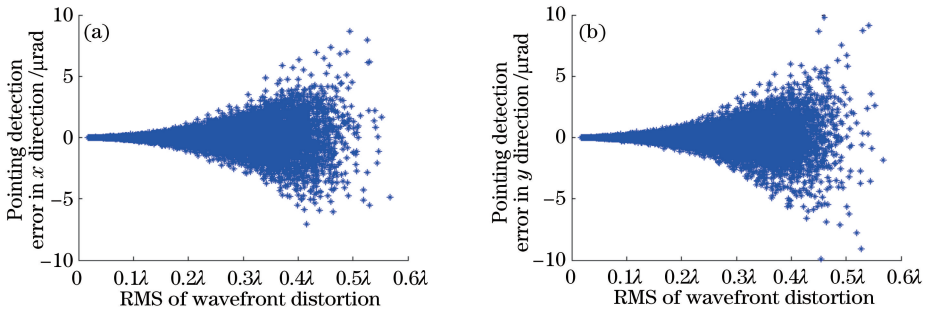


图 3 指向探测误差与光束波前畸变的关系。(a) x 方向; (b) y 方向
 Fig. 3 Relationship between pointing detection error and beam wavefront distortion. (a) x direction; (b) y direction

2.2 以子口径光束为对象进行计算

如图 4 所示,取处于整口径不同位置处的 5 路子光束,分别标记为 1、2、3、4、5,子光束的口径 D_{sub} 分别为整光束口径 D 的 $1/3$ 、 $1/2$ 和 $2/3$ 。

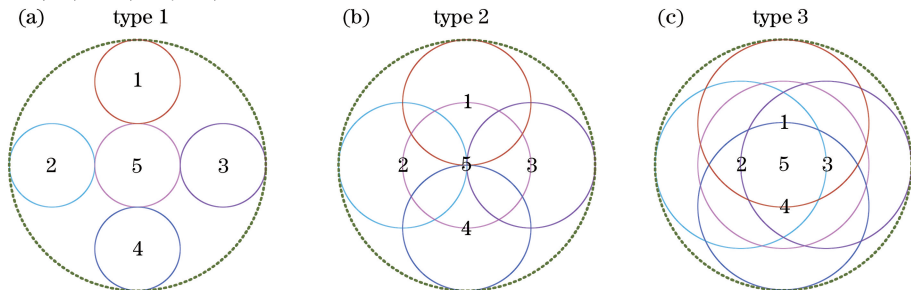


图 4 子光束的排布。(a) $D_{\text{sub}}/D=1/3$; (b) $D_{\text{sub}}/D=1/2$; (c) $D_{\text{sub}}/D=2/3$
 Fig. 4 Arrangements of sub-beams. (a) $D_{\text{sub}}/D=1/3$; (b) $D_{\text{sub}}/D=1/2$; (c) $D_{\text{sub}}/D=2/3$

图 5 给出了 x 方向上根据子光束计算得到的整口径光束指向探测误差。可以看出,对于子光束,其口径越大,探测误差越接近整口径的计算结果。这是由于根据子光束计算时,探测误差直接由子光束内的波前畸变决定,口径越小,结果受局部波前畸变的影响就越大。对于不同位置处的子光束,探测误差之间没有直

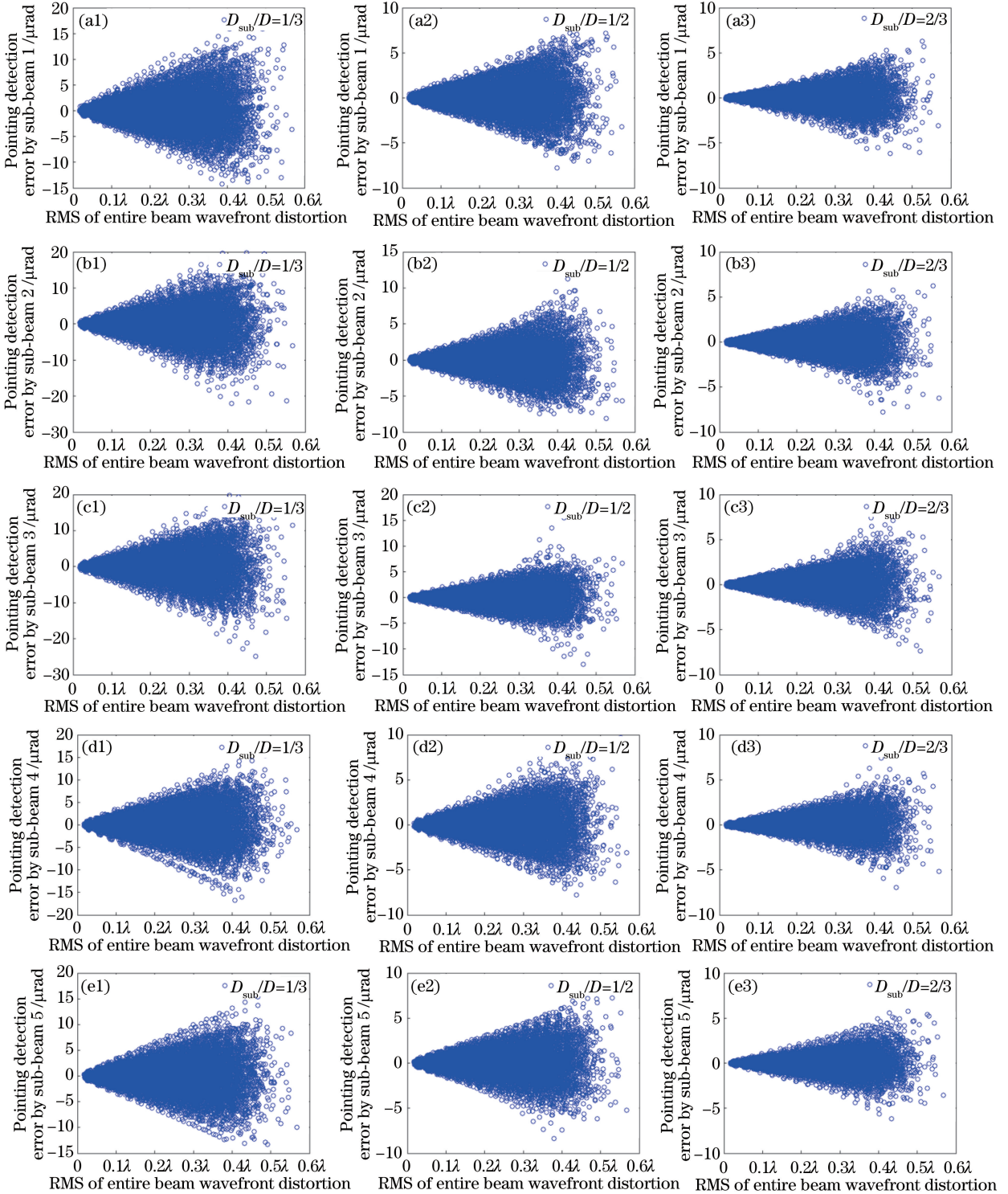


图 5 由子光束计算整口径光束 x 方向的指向探测误差。(a1)(a2)(a3)子光束 1;(b1)(b2)(b3)子光束 2;
(c1)(c2)(c3)子光束 3;(d1)(d2)(d3)子光束 4;(e1)(e2)(e3)子光束 5

Fig. 5 Pointing detection errors in x direction calculated by sub-beams. (a1)(a2)(a3) Sub-beam 1;
(b1)(b2)(b3) sub-beam 2; (c1)(c2)(c3) sub-beam 3; (d1)(d2)(d3) sub-beam 4; (e1)(e2)(e3) sub-beam 5

接的联系。另外,总体上,光束的波前畸变越小,根据子光束计算得到的探测误差越小,这与根据整光束计算的结果一致。 y 方向上的结果类似。若采用子光束计算整光束的指向,为了减小波前畸变引起的光束指向探测误差,应选取波前畸变相对较小的子光束区域。

3 结 论

对于大口径光束的相干合成,波前畸变在影响光束质量的同时也会影响光束指向探测。随着波前畸变的增加,光束指向探测误差总体呈上升趋势;当波前畸变的均方根值小于 0.163λ 时,由波前畸变引起的光束指向探测误差小于 $0.5 \mu\text{rad}$,当波前畸变的均方根值小于 0.234λ 时,光束指向探测误差小于 $1 \mu\text{rad}$ 。若采用子光束计算整光束的指向,其计算结果受局部波前畸变的影响较大,因此,为了减小波前畸变引起的光束指向探测误差,应选取波前畸变相对较小的子光束区域。在系统实际工作中,可以预先标出静态波前畸变带来的探测误差;对于动态波前畸变,可以通过控制光束质量、减小波前畸变来减小探测误差。

参 考 文 献

- [1] Umstadter D. Relativistic laser-plasma interactions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(8): R151-R165.
- [2] Bulanov S V, Esirkepov T Z, Habs D, *et al.* Relativistic laser-matter interaction and relativistic laboratory astrophysics [J]. *The European Physical Journal D*, 2009, 55(2): 483-507.
- [3] Zhang Jie, Zhao Gang. Introduction to laboratory astrophysics[J]. *Physics*, 2000, 29(7): 393-396.
张 杰, 赵 刚. 实验室天体物理学简介[J]. *物理*, 2000, 29(7): 393-396.
- [4] Kluge H J, Nortershauser W. Lasers for nuclear physics[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2003, 58(6): 1031-1045.
- [5] Fan Dianyuan, Zhang Xiaomin. Laser fusion and high power laser: History and progress[J]. *Physics*, 2010, 39(9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光:历史与进展[J]. *物理*, 2010, 39(9): 589-596.
- [6] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, *et al.* Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress prospect and challenge[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(2): 0201010.
王小林, 周 朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201010.
- [7] Geng C, Luo W, Tan Y, *et al.* Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25045-25055.
- [8] Mu J, Li Z L, Jing F, *et al.* Coherent combination of femtosecond pulses via non-collinear cross-correlation and far-field distribution[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 234-237.
- [9] Huang Zhimeng, Tang Xuan, Liu Cangli, *et al.* Analysis of influence of tip/tilt phase error on a large scale coherent beam combination of fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1102003.
黄智蒙, 唐 选, 刘仓理, 等. 倾斜相差对大阵列光纤相干合成的影响与分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1102003.
- [10] Mu Jie, Wang Xiao, Jing Feng, *et al.* Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high-power laser facilities[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0602010.
母 杰, 王 逍, 景 峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602010.
- [11] Zhou Pu, Ma Haotong, Ma Yanxing, *et al.* Influence of wavefront distortion in single laser channel on phase control in coherent beam combination system[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1265-1268.
周 朴, 马浩统, 马闯星, 等. 单链路光束波前畸变对相干合成系统相位控制的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1265-1268.
- [12] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 207-211.