

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0297-03

激光大气传输相位不连续性的数值计算*

范承玉 王英俭 龚知本

(中科院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 利用激光大气传输及其校正四维程序对激光大气传输相位不连续性问题进行了数值计算, 分析了相位不连续点密度与湍流强度、传输距离的关系和不同波长信标情况下的相位不连续性及其对校正效果的影响。计算结果表明, 用大气相干长度(或 d/r_0) 以及自适应光学系统带宽, 并不能完全描述自适应光学相位校正效果。尤其是在长距离激光大气传输中, 这时在自适应光学相位校正中, 需要考虑闪烁的影响。

关键词: 传输; 相位不连续点; 自适应光学

中图分类号: TN012 文献标识码: A

Numerical Computation of Branch Point Problem in Laser Propagation Through Atmosphere

FAN Cheng-yu WANG Ying-jian GONG Zhi-ben

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract The branch point problem was computed by four-dimension code of laser propagating in atmosphere and compensation of adaptive optics in this paper. The relation of density of branch point with atmospheric turbulence and propagating range was analyzed. The problem of branch point of various beacon and its effect on compensation of adaptive optics were analyzed too. These computational results showed that the compensative effect of adaptive optics is not characterized completely by coherence length and frequency bandwidth of adaptive-optics system. The effect of scintillation needs to be considered in compensation of adaptive optics when a laser beam propagated over a long distance through even weak atmospheric turbulence.

Key words propagation; branch point; adaptive optics

1 引言

激光在大气中传输时, 大气湍流将导致光波振幅和相位的随机调制, 从而产生相长干涉和相消干涉, 在完全相消干涉时, 光场的振幅为零, 在光场振幅为零的点其相位不确定, 这点称之为相位不连续点^[1]。相位不连续点的研究已有二十多年, 近年来激光大气传输中的相位不连续性问题也得到了广泛关注, 已经在激光大气传输模拟计算^[1]和近地面水平激光传输实验中^[2,3]观察到相位不连续点。虽然已对激光大气传输中相位不连续性问题及其对自适应光学相位校正的影响进行了一些研究, 但是, 为了更好地克服不连续相位给激光大气传输及其自适应光学校正带来的不利影响, 需要进行理论和实

验方面的研究工作, 通过研究相位不连续点的形成、空间演化和消失过程可以获得大气湍流的信息, 如何使自适应光学变形镜能够实现对不连续波前的相位共轭^[4]问题也需要探讨, 因此关于相位不连续点问题的进一步研究工作是需要。本文利用激光大气传输及其校正四维程序对激光大气传输相位不连续性问题进行了分析和计算, 分析了相位不连续点对的数密度与湍流强度、传输距离的关系和不同波长信标情况下的相位不连续性及其对常规自适应光学校正的影响。

2 相位不连续点的理论

定义激光在大气传输过程中在采样区域内的畸变光场为 $u(\mathbf{r}_{i,j})$, 这个畸变光场所对应的主值相位为 $\varphi(\mathbf{r}_{i,j})$, 这里 $\mathbf{r}_{i,j}$ 代表一采样点在光场的位置, 它

* 国家 863 计划激光技术主题资助课题。

包含的 x 和 y 两个方向分量,其位置分别为 $i \times d$ 和 $j \times d$, d 表示两个邻近采样点间的间距。这里的采样区域既可以表示为激光大气传输模拟计算中计算数组的点也可以认为是自适应光学中波前探测器子孔径所组成的数组。采样区域内畸变光场和所对应的相位之间的关系可由下式表示

$$\varphi(r_{i,j}) = \text{Im}[\log\{u(r_{i,j})\}] \quad (1)$$

这里对数函数的虚部就是相位的主值,它的范围在 $-\pi$ 和 $+\pi$ 之间。这一采样区域内的主值相位差 $r(r_{i,j})$ 可表示为

$$g(r_{i,j}) = d^{-1} \text{Im}[\log\{u[(i+1)d, jd]u^*(id, jd)\}]I_x + d^{-1} \text{Im}[\log\{u[id, (j+1)d]u^*(id, jd)\}]I_y \quad (2)$$

当光场中有相位不连续点时,围绕这个点的主值相位差的闭环路径积分之和等于 $\pm 2\pi$, 这里的“+”或“-”与不连续点的极性有关,用数学形式可表示为

$$g(r_{i,j})I_x d + g(r_{i+1,j})I_y d - g(r_{i,j+1})I_x d - g(r_{i,j})I_y d = \begin{cases} \pm 2\pi & \text{if a branch point is enclosed} \\ 0 & \text{if no branch point is enclosed} \end{cases} \quad (3)$$

这个环路是一个矩形,它的四个角的位置在 $r_{i,j}$, $r_{i+1,j}$, $r_{i+1,j+1}$ 和 $r_{i,j+1}$, (4)式中的负号是考虑了沿矩形的移动方向与单位矢量 I_x 和 I_y 方向相反的结果。

利用(4)式就可以计算出激光在大气中传输时,畸变光场中出现的不连续点的数量。相位不连续点一般是成对出现的,在计算过程中,只要求出正不连续点或负不连续点的数密度,就可以知道不连续点对的数密度。

3 计算结果

我们利用激光大气传输及其校正四维数值模拟程序^[6]对激光大气传输相位不连续性问题及其对校正的影响进行了计算和分析。首先计算几种传输距离情况下相位不连续点对数密度与大气相干长度的关系,传输距离分别为 3 km, 6.8 km, 10 km 和 20 km 四种情况,信标光和主激光的波长均为 $1.315 \mu\text{m}$,计算网格为 256×256 ,模拟激光发射孔径为 0.6 m ,信标光传输到接收望远镜后计算其相位不连续点对数密度,同时提取信标光的相位信息,对主激光在大气中传输进行相位校正,计算其校正效果。图 1 给出了四种不同传输距离条件下相位不连续点对数密度随大气相干长度的变化关系及自适应光学的校正效果,图中的 d 对应哈特曼探测器子孔径大小。由图可以看出:湍流强度较弱时,相位不

$$g(r_{i,j}) = \frac{\{\varphi(r_{i+1,j}) - \varphi(r_{i,j})\}_p I_x + \{\varphi(r_{i,j+1}) - \varphi(r_{i,j})\}_p I_y}{d} \quad (2)$$

这里 $\{\dots\}_p$ 表示对相位差取主值,也就是在相位差中加上 2π 或减去 2π ,使相位差值在 $-\pi$ 和 $+\pi$ 之间, I_x 和 I_y 分别为 x 和 y 方向的单位矢量。对相位差取主值是非常重要的,这样做可以使其主值与实测的值保持一致。在我们的激光大气传输数值计算中,直接用下式计算主值相位差 $g(r_{i,j})$ ^[5]:

连续点对数密度随湍流强度的增强变化很缓慢。一旦达到一定的湍流强度,相位不连续点对数密度随湍流强度增强而迅速增加;在上述四种传输距离下,大气相干长度分别大约为 6 cm, 9 cm, 11 cm, 14 cm 时出现相位不连续点。由此可见,相位不连续点对数密度不仅与大气相干长度有关,与传输距离也密切相关。在相同的大气湍流相干长度下,传输距离越远,振幅起伏越大,出现零光强点的概率越大,相位不连续点对数密度相应也越大,对自适应光学相位校正效果影响越大。如在大气相干长度为 8 cm 时,传输距离为 3 km 时,几乎没有相位不连续点,自适应光学校正后的 Strehl 比约为 0.57;传输距离为 10 km 时,相位不连续点对数密度达到约 30 对/ m^2 , Strehl 比约为 0.42;而当传输距离为 20 km 时,相位不连续点对数密度达到约 170 对/ m^2 , Strehl 约为 0.16。

另外,还计算了一定传输距离下不同波长激光大气传输相位不连续点对数密度与湍流强度的关系及校正效果,这里的湍流强度都以 $1.315 \mu\text{m}$ 激光的大气相干长度来表示。图 2(a)为 10 km 传输距离情况下几种不同波长激光大气传输相位不连续点对数密度随湍流强度(相干长度)的关系,图 2(b)为分别将这几种波长的激光作为信标,对 $1.315 \mu\text{m}$ 主激光进行常规自适应光学相位校正情况下的校正效果。由图可见,在相同传输距离和大气湍流强度情况下,不同波长激光大气传输湍流效应强弱不同,

其产生的相位不连续点密度也不同。在同样的大气湍流强度和传输距离条件下,不同波长的信标光的

相位不连续性严重程度不同,常规自适应光学相位校正效果也有所不同(计算中不考虑色散效应)。

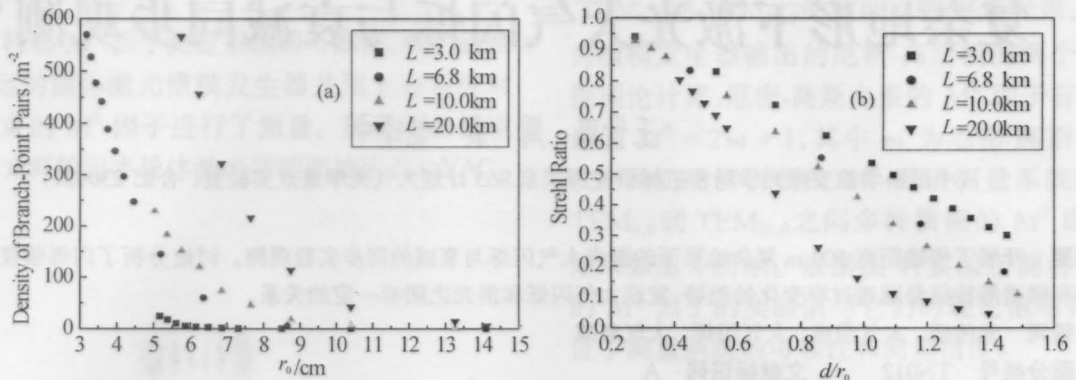


图1 不同传输距离条件下,不连续点密度和 Strehl 比与大气相干长度的关系

(a) 不连续点密度与相干长度的关系; (b) Strehl 比与相干长度的关系

Fig. 1 The density of branch point and Strehl ratio vary with coherence length in various propagation ranges

(a) Density of branch point varies with coherence length; (b) Strehl ratio varies with coherence length

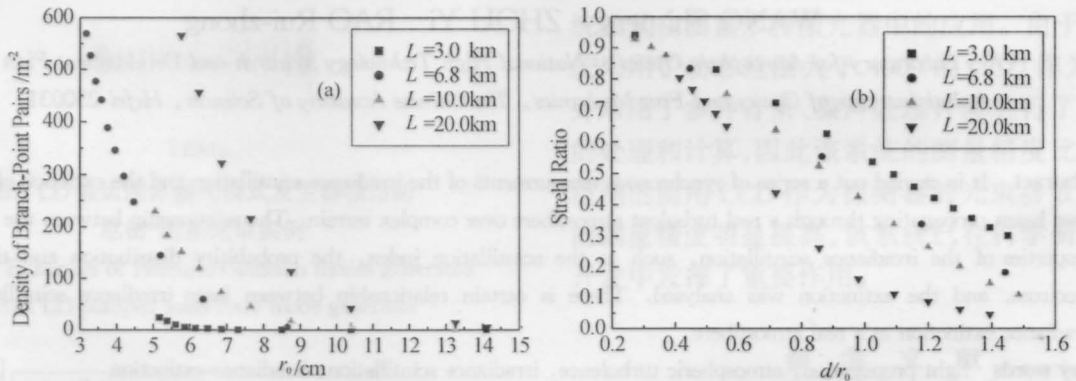


图2 不同信标波长条件下,不连续点密度和 Strehl 比与大气相干长度的关系

(a) 不连续点密度与相干长度的关系; (b) Strehl 比与相干长度的关系

Fig. 2 The density of branch point and Strehl ratio vary with coherence length in various wavelength of beacon

(a) Density of branch point varies with coherence length; (b) Strehl ratio varies with coherence length

4 结 论

计算结果表明,激光在大气中进行长距离传输时,即使大气湍流很弱也可以导致很强的光强起伏(强闪烁),从而导致光波相位中出现不连续点,它将对自适应光学相位校正带来影响。用大气相干长度(或 d/r_0)以及自适应光学系统带宽,并不能完全描述自适应光学相位校正效果。尤其是在长距离激光大气传输中,这时在自适应光学相位校正中,需要考虑闪烁的影响。

参 考 文 献

1 D. L. Fried, J. V. Vaughn. Branch cuts in the phase

function. *Appl. Opt.*, 1992, **31**:2865~2882

2 C. A. Primmerman T. R. Price, R. A. Humphreys *et al.*. Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions. *Appl. Opt.*, 1995, **34**: 2081~2088

3 范承玉,王英俭,龚知本. 光波相位不连续点的探测. *光学学报*, 2001, **21**(11):1388~1391

4 N. B. Baranova, A. V. Mamaev, N. F. Pilipetsky *et al.*. Wave-front dislocations: topological limitations for adaptive systems with phase conjugation. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**:525~528

5 D. L. Fried. Branch point problem in adaptive optics. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**:2759~2768

6 王英俭. 激光大气传输及其相位补偿若干问题探讨, 博士论文,中国科学院安徽光学精密机械研究所,1996