

文章编号: 1001-3806(2012)04-0485-05

激光大气传输光波相位不连续性问题研究进展

葛筱璐¹, 冯晓星², 范承玉²

(1. 山东理工大学 理学院, 淄博 255049; 2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 激光在大气中长距离传输时, 即使湍流很弱也会产生强湍流效应。在强湍流效应中, 一个重要的问题就是光波的相位不再是连续的, 相位不连续性问题会引起现有的自适应光学校正能力的降低。介绍了相位不连续点产生的机理和基本性质, 阐述了激光大气传输相位不连续性问题近年来的研究进展, 为激光大气传输及自适应光学校正技术研究工作的更好开展提供了参考。

关键词: 大气与海洋光学; 自适应光学; 不连续相位; 激光传输; 大气湍流

中图分类号: TN929.12; P425.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.013

Progress of the study of phase discontinuity of laser propagation through atmosphere

GE Xiao-lu¹, FENG Xiao-xing², FAN Cheng-yu²

(1. School of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: With laser beam propagating over a long distance through even weak atmospheric turbulence, significant turbulence effect might happen so that a continuous phase function does not exist in general owing to the presence of branch points in phase. Branch points could induce degradation of the performance of a standard adaptive optics system when it is used to compensate atmospheric turbulence. The generation and development, the optical properties and topological characteristics of branch points in the atmosphere were introduced. The study of phase discontinuity of laser propagation through atmosphere was reviewed so as to provide a reference for further study of laser propagation through atmosphere and adaptive optics system.

Key words: atmospheric and ocean optics; adaptive optics; discontinuous phase; laser propagation; atmospheric turbulence

引言

激光在湍流大气中传输时, 湍流将对它产生各种效应, 如光强闪烁、相位畸变、光斑扩展和漂移等, 这些效应均会导致激光光束质量的严重退化, 从而对跟踪、测距、光学成像、激光通讯以及激光武器等众多的激光工程应用产生不利的影 响。不同的效应对不同的激光工程应用的影响又各不相同, 其中有的影响很大, 甚至使某些工程难以实现。因此, 弄清激光在大气中传输

的规律及如何减小大气对激光传输的影响, 已成为激光在大气中应用的一项重要的基础性工作, 并且这将会给众多激光工程应用的可行性及工程系统的优化设计提供科学依据。

已有的描述湍流效应的理论, 在弱湍流效应情况下与实验结果是一致的, 并且自适应光学系统对弱湍流效应的校正也是十分有效的。然而, 在许多实际应用中, 特别是激光在大气中长距离传输时, 即使大气湍流很弱, 也将产生强湍流效应。对于强湍流效应, 不但在它的描述方法和统计规律性的认识上, 而且在自适应光学技术的校正中, 还有许多问题没有解决。这是因为, 在强湍流效应条件下, 除了光强闪烁、光斑漂移和扩展等现象外, 还出现了一些新的湍流效应现象, 如扰动的光波相位不连续性问题, 即在传输的畸变光场中会出现零光强点, 在零光强点处的光波相位是不连续的, 此点就称之为相位不连续点^[1]。

基金资助: 中国科学院大气成分与光学重点实验室开放课题基金资助项目(JJ-10-03)

作者简介: 葛筱璐(1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事激光大气传输及自适应光学相位校正方面的研究。

E-mail: xlge@sdut.edu.cn

收稿日期: 2011-11-22; 收到修改稿日期: 2011-11-28

1 相位不连续点产生的理论及其基本性质

1.1 相位不连续点

关于相位不连续点可以通过一个简单的例子来说明。假设一光场函数为：

$$U(x, y) = (x + iy) \exp(-x^2 - y^2) \quad (1)$$

(x, y) 表示与传输方向垂直的平面上点的位置。图 1 中给出了其光强和相位分布,从图中可以看出,在点 $(0, 0)$ 处光强为 0,在相位分布图的左边,相位有 2π 的跳跃,围绕点 $(0, 0)$ 的闭环路径积分的和为 2π ,点 $(0, 0)$ 就称之为相位不连续点。

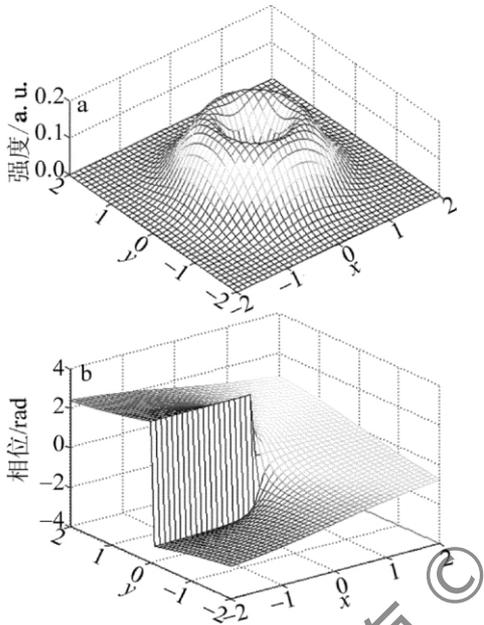


图 1 光场 $U(x, y) = (x + iy) \exp(-x^2 - y^2)$ 的光强和相位分布

1.2 相位不连续点产生的原因^[2]

假设从点 S_1 和点 S_2 发出两个相同的波脉冲,从点 P 观察信号的变化情况。图 2a 表明了,在 P 点观察到的振幅被一包络调制的单色波脉冲;图 2b 中给出了包络的形状并标出了脉冲波峰和波谷的位置,观察点 P 的信号依靠路径差 $S_1P - S_2P$;在图 2c 中,观察点

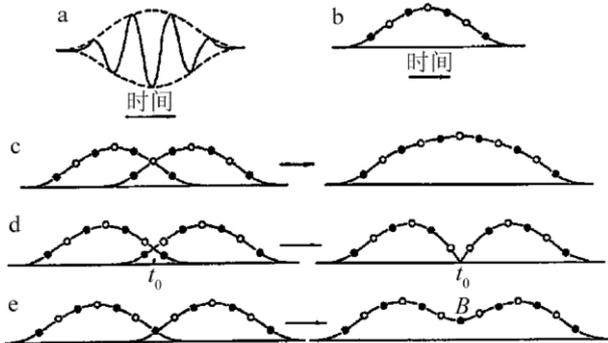


图 2 脉冲波随时间变化进行干涉所产生的相位不连续点

a—脉冲波形 b—脉冲的图示(●代表波峰,○代表波谷) c—两列波的路径差为 2 个波长 d—两列波的路径差为 2.5 个波长 t_0 时刻可产生相消干涉 e—两列波的路径差为 3 个波长,一个新的波峰 B 出现

P 移到两列波的路径差为两个波长的位置,因此,载波互相加强,结果为图 2c 的右图;在图 2d 中,观察点 P 移到两列波的路径差为 2.5 个波长的位置,这时产生相消干涉,在时刻 t_0 产生完全相消干涉;在图 2e 中,两列波的路径差为 3 个波长,载波再次互相加强。从图 2d 中可以看出,在时刻 t_0 发生完全相消干涉,这时在该点的波的振幅为 0,就会出现相位不连续点。激光在大气中传输时,由于湍流介质的作用,使得光波产生衍射,当这些衍射波传输到远处时,就会产生相长或相消干涉,在完全相消干涉的地方,光波的振幅为 0,此点即为相位不连续点。

1.3 相位不连续点的基本性质

相位不连续点是由光波相互干涉时产生的,当具体地描述任一点的相位分布时,相位不连续点的重要性就突现出来了,因为波的振幅为 0 的点处,其相位是无法确定的。

光波传输的复标量场是空间和时间的函数,可用一个复函数 $U(r, t)$ 来表示,通常省略时间变量 t ,表示为:

$$U = \rho \exp(i\psi) = u + iv \quad (2)$$

式中 ρ 和 ψ 表示复场的模和幅角,也就是光场的振幅和相位, u 和 v 代表复光场的实部和虚部,在相位不连续点处的复场 $U=0$, u 和 v 应该同时为 0。

下面用一个简单的复波场来讨论相位不连续点的一些基本性质,例如波场^[2]:

$$U = (x + iy) \exp(iky) \quad (3)$$

不管波数 k 的符号是正还是负,有一个正的相位不连续点位于坐标原点。它的等值相位线从不连续点出发,由于因子 $\exp(iky)$ 的作用,在远离相位不连续点后的等值相位线与 x 轴平行,接近相位不连续点的波前,如图 3 所示。相位不连续点的拓扑电荷为 +1,即围绕相位不连续点沿着逆时针方向闭环等值相位路径的积分之和为 $+2\pi$,如果把 (3) 式中的因子 $x + iy$ 变成 $x - iy$,有一个负的相位不连续点位于坐标原点,这时围绕相位不连续点沿着逆时针方向闭环等值相位路径的积分之和为 -2π ,相位不连续点的拓扑电荷为 -1。

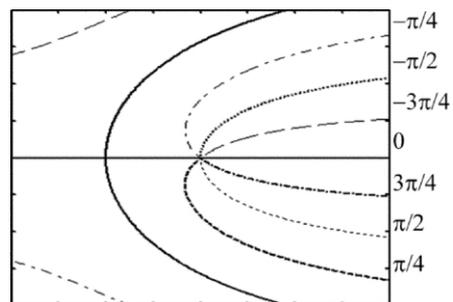


图 3 复场 $U = (x + iy) \exp(iky)$ 的波前,在坐标原点有一个正的相位不连续点(这里 $k=1$ 相位取 2π 的模)

在一个复场平面上,特别是在光波传输强湍流效应情况下,大气湍流导致的畸变光场中会出现许多相位不连续点,当与传输方向垂直的平面上的某一点存在一个正的相位不连续点,其拓扑电荷为 +1,而与它相邻的相位不连续点的拓扑电荷问题, FREUND 等人对此作了深入的研究^[3]。

事实上,复场中的实部 $u = 0$ 和虚部 $v = 0$ 的点所组成的点集把一个平面分成了四部分,这四部分在相位不连续点相汇,图 4 中给出了一个例子。从图 4 中可以看出,在 $u = 0$ 和 $v = 0$ 的等值线上,相邻的两个相位不连续点之间的符号相反,这是由于沿着 $u = 0$ 的等值线,相位不连续点附近两边 v 的梯度符号相反;另外,在一个闭环的 $u = 0$ 或 $v = 0$ 等值线路径上,相位不连续点的数目应该是偶数,相位不连续点的正负是交替变化的,累积的拓扑电荷为 0。

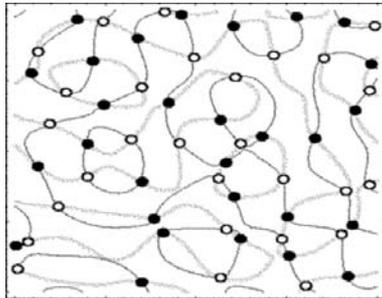


图 4 随机波场中相位不连续点符号原理的说明(图中粗线表示 $u = 0$ 的等值线,细线表示 $v = 0$ 的等值线,●表示正的相位不连续点,○表示负的相位不连续点)

从相邻的相位不连续点间的符号性质,可以进一步引申一个更重要的事实:随着光波向前传输,大气湍流导致的畸变光场中相位不连续点是成对(一个正的和一负相位不连续点组成的对)地产生或湮灭。

对(3)式作修改,如下式:

$$U = [k(x^2 - ax) + iy] \exp(iky) \quad (4)$$

它含有两个相位不连续点,其位置分别为 $(0, 0)$ 点和 $(a, 0)$ 点,其波前如图 5 所示,从图中可以看出,一个是正的相位不连续点,另一个是负的相位不连续点。

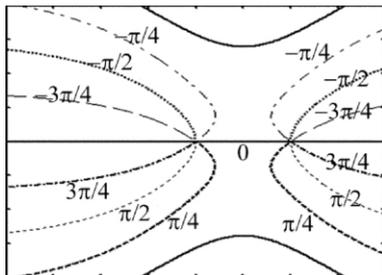


图 5 复场 $U = [k(x^2 - ax) + iy] \exp(iky)$ 的波前,分别在 $(0, 0)$ 和 $(a, 0)$ 有相位不连续点(这里 $k = 1$ 相位取 2π 的模)

为了进一步说明相位不连续点是成对产生或湮灭的,把(4)式再作修改,得到:

$$U = [k(x^2 - ax) + ik(y^2 - by)] \exp(iky) \quad (5)$$

它的波前如图 6 所示,除了在 $(0, 0)$ 点和 $(a, 0)$ 点有一对相位不连续点外,在 $(0, b)$ 点和 (a, b) 点也产生了一对相位不连续点,随着 b 的减小,在位置 $(0, b)$ 和 (a, b) 的相位不连续点逐渐向下移动,当 $b = 0$ 时,这一对相位不连续点就消失了。

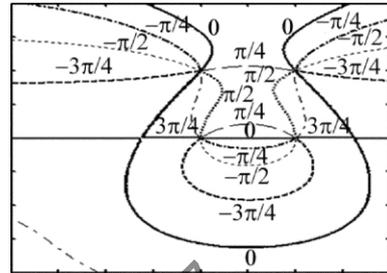


图 6 复场 $U = [k(x^2 - ax) + ik(y^2 - by)] \exp(iky)$ 的波前,有 4 个相位不连续点,其位置分别在 $(0, 0)$ 、 $(a, 0)$ 、 $(0, b)$ 和 (a, b) (这里 $k = 1$ 相位取 2π 的模)

2 激光大气传输相位不连续性问题国内外研究进展

相位不连续点的概念最初是由 NYE 和 BERRY^[2] 研究南极冰层底部的无线电回波时提出的。后来他们在实验室中利用超声波对相位不连续点的特性进行了一些研究,研究结果表明,相位不连续点可以随着波前向不同的方向运动,并有可能互相干涉;相位不连续点可以成对地产生和湮灭。随着相位不连续点概念的提出,各国学者对光波相位不连续性问题进行了大量的研究而逐步形成了奇点光学分支^[2,4-6]。

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,已经有一些关于激光大气传输相位不连续性的理论和数值模拟研究。FRIED 和 VAUGHN^[7] 从理论上对激光大气传输中大气湍流导致的畸变光场的特性进行了研究,他们发现畸变光场中存在许多光强为 0 的区域,在这些区域内的光波相位是不能确定的,存在一个 2π 的不确定性问题。VOITSEKHOVICH^[8] 等人根据随机过程理论及光场起伏是各向同性的假设,研究了畸变光场中相位不连续点的数密度与大气湍流和传输条件的关系,通过理论分析和数值模拟得到了一个表述畸变光场中出现的相位不连续点数密度的经验公式。由于该表达式中用到了对数振幅的导数方差,该变量只有在模拟计算中才可以获得,实际大气传输场景中不可能对该变量进行测量。FAN^[9] 利用激光大气传输 4 维程序对不同大气传输条件下,不同传输光波长的畸变光场中出现的相位不连续点数密度进行了模拟计算,同时结合可以实测的大气相干长度和 Rytov 方差等参量对计算结果进行了分析,给出了一个包含这些参量的描述相位不连

续点数密度的统一变量。YUAN 等人^[10]基于 Rytov 近似和几何光学近似,给出了光波相位不连续点数密度的修正表达式,分析了相位不连续点数密度随湍流内尺度、Rytov 方差和 Fresnel 尺寸的变化情况。另外,作者也进行了有关相位不连续性的理论研究和数值分析^[11-13],得到了激光大气传输畸变光场中产生的相位不连续点的时空演化特征,即相位不连续点是随着波前运动的,并且可以成对地产生或湮灭;当传输路径中的某一位置固定时,垂直于传播方向的畸变光场内的相位不连续点所在的位置随时间的变化是不确定的,但在传输条件一定的情况下,该位置处的相位不连续点总数的统计平均值是可以确定的;还得到了畸变光场中出现的相位不连续点的数目,不仅与描述光强起伏量的大气湍流强度、传输路径长度和传输光的波长有关,而且还与湍流的内尺度有关;相位不连续点的数目随湍流强度的变化有一个从无到有,从缓慢增加到近似线性的急剧增加,而后又缓慢增加的变化过程,并且在不同的传输条件下,相位不连续点的数目及其变化存在很大的差异。RAO^[14-15]利用数值方法模拟了湍流大气中平面波的传播,给出了两种不同情况下相位不连续点数密度随闪烁指数的变化关系,即一种情况是湍流强度不变,传播距离改变;另一种情况是传播距离不变,湍流强度改变。在两种情况下,相位不连续点数密度随闪烁指数的变化关系有差别,但都随着闪烁指数的增大而急剧增加。

FRIED^[16]以及国内的 LI^[17]等人又从理论上研究了不连续相位对激光大气传输自适应光学校正的影响,认为常规的最小方差法重建波前代数不能重建不连续相位,所以,当畸变光场中出现相位不连续点时,必将导致自适应光学校正能力的下降。ROGGEMANN 等人^[18-19]提出了一种波前探测处理代数,它利用波前探测器子孔径上的信标光的强度信息和信标光到达接收望远镜后,聚焦的光斑强度信息与变形镜模型函数进行非线性最小方差拟合,然后去控制变形镜,从而达到补偿大气湍流的目的。模拟计算结果表明,采用该种波前处理代数的自适应光学系统,在强湍流效应情况下,对湍流大气的补偿能力与采用最小方差法波前处理代数的自适应光学系统相比有显著的改善。当然 ROGGEMANN 等人提出的波前处理方法仅计算了信标光波长与主激光波长相同的情况,而两种波长不同的情况并没有处理。FAN^[9, 20-22]等人通过理论分析和数值模拟计算发现,当考虑不连续相位对自适应光学校正的影响时,不同间距的相位不连续点所产生的相位方差对自适应光学校正的影响是不同的;信标光的波长比发射光波长稍长一些时能取得更好的校正效

果,随着光强起伏方差增大,为了取得更好的校正效果,信标光波长与发射光波长的差异也应越大。

关于不连续相位的重建问题也有一些研究。FRIED^[16]认为,当畸变光场中出现相位不连续点时,畸变光场的波前相位包括两部分:一部分是连续相位部分,可以通过常规波前重建方法进行重建,如最小方差法等;另一部分为不连续相位部分,如果能够准确探测出相位不连续点的位置,则直接可用公式给出不连续相位。GHIGLIA^[23]等提出了一种不连续相位的重建方法,就是首先识别出相位不连续点的位置,然后用路径积分法重建出不连续相位。上述两种方法都存在一个共同问题,就是如何准确地探测出相位不连续点的位置。BIGOT^[1]等人也提出了一种不连续相位的重建方法,就是利用 Hartmann 波前探测器探测的波前斜率和探测器子孔径上的光强数据,首先重建出光场,然后再导出波前相位,但其前提条件是所测得的波前斜率必须包含不连续相位的信息,这与实际 Hartmann 波前探测器的子孔径大小有关。FAN^[24]等人对 BIGOT 提出的算法进行了改进——利用子孔径光强作为权重因子,这样弱光强子孔径斜率测量误差被大大抑制,然后在此基础上对实测的斜率数据进行分析,从而得到了相位不连续点。TYLER^[25]提出直接利用测得的相位梯度重建出不连续相位。AKSENOV^[26]等利用调整后的相位梯度矢量场的性质,给出相位斜率的单一函数,然后再进行不连续相位的重建。BANAKH^[27]等通过对 FRIED 和 TYLER 提出的两种重建方法的比较,认为 TYLER 提出的方法要好于 FRIED 提出的,因为随着湍流强度的增加,该方法不会降低重建相位的准确度。

在近地面若干千米激光大气传输强湍流效应及其自适应光学校正的实验中,已经证明光波相位中确实会出现不连续点,并对自适应光学的校正能力造成影响^[24, 28-30]。

3 小结

目前,对激光大气传输强湍流效应中出现的相位不连续性问题已有了一定的认识。当考虑到相位不连续点数的变化过程时,能否就相位不连续点数与传输大气条件的关系,建立一个统计模型或经验公式用以描述强湍流效应,还需要进一步的理论分析与计算;当相位不连续点出现时,对实际自适应光学系统校正能力的影响程度如何还不是很清楚;如何重建出不连续相位,使其能用于实际的自适应光学系统还需要进一步的研究。

通过对激光大气传输强湍流效应中的相位不连续性问题的研究,不仅可以提高对激光大气传输强湍流效

应问题的认识,而且有助于推动自适应光学技术的进一步发展,使之应用于强湍流效应情况下的激光大气传输工程,提高自适应光学对强湍流效应的校正能力。

参 考 文 献

- [1] le BIGOT E O, WILD W J, KIBBLEWHITE E J. Reconstruction of discontinuous light-phase functions [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(1): 10-12.
- [2] NYE J F, BERRY M V. Dislocations in wave trains [J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1974, A336: 165-190.
- [3] FREUND I, SHVARTSMAN N. Wave-field phase singularities: the sign principle [J]. *Physics Review*, 1994, A50(6): 5164-5172.
- [4] WRIGHT F J. Wavefront dislocations and their analysis using catastrophe theory, structural stability in physics [M]. Berlin: Springer, 1979: 141-147.
- [5] NYE J F. The motion and structure of dislocations in wavefronts [J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1981, A378: 219-239.
- [6] BERRY M. Singularities in wave and rays, physics of defects [M]. Amsterdam, Holland: North-Holland Publishing Company, 1981: 456-541.
- [7] FRIED D L, VAUGHN J L. Branch cuts in the phase function [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(15): 2865-2882.
- [8] VOITSEKHOVICH V V, KOUZNETSOV D, MOROZOV D K. Density of turbulence-induced phase dislocations [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4525-4535.
- [9] FAN Ch Y. The study of phase discontinuity of laser propagation through atmosphere and correction [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003: 46-56 (in Chinese).
- [10] YUAN K E, ZHU W Y, RAO R Zh. Density of phase branch points for a light wave propagation in atmospheric turbulence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 410-413 (in Chinese).
- [11] GE X L, FAN Ch Y, WANG Y J. Numerical computation of the character of branch points' temporal and spatial variation in laser propagation through atmosphere [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1066-1070 (in Chinese).
- [12] GE X L, FAN Ch Y. Relationship between the number of branch points and the characteristic parameters of turbulence effect [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(1): 28-31 (in Chinese).
- [13] GE X L, FAN Ch Y, WANG Y J. Numerical computation of branch points number's behavior with turbulence strength in laser propagation through atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 1-6 (in Chinese).
- [14] RAO R Zh. Statistics of the fractal structure and phase singularity of a plane light wave propagation in atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 269-276.
- [15] RAO R Zh. Optical vortices and its propagation in the atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 609-615 (in Chinese).
- [16] FRIED D L. Branch point problem in adaptive optics [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1998, A15(10): 2759-2768.
- [17] LI Y K. Branch point effect on adaptive correction [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5490: 1064-1070.
- [18] ROGGMANN M C, KOIVUNEN A C. Branch-point reconstruction in laser beam projection through turbulence with finite-degree-freedom phase-only wave-front correction [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, A17(1): 53-62.
- [19] ROGGMANN M C, KOIVUNEN A C. Wave-front sensing and deformable-mirror control in strong scintillation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, A17(5): 911-919.
- [20] FAN Ch Y, WANG Y J, GONG Zh B. Effect of branch points on adaptive optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(5): 435-438 (in Chinese).
- [21] FAN Ch Y, WANG Y J, GONG Zh B. Compensation of adaptive optics for different wavelength of beacon in strong scintillation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(11): 1489-1492 (in Chinese).
- [22] FAN Ch Y, WANG Y J, GONG Zh B. Effects of different beacon wavelengths on atmospheric compensation in strong scintillation [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(22): 4334-4338.
- [23] GHIGLIA D C, PRITT M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms and software [M]. New York, USA: Wiley-Interscience, 1998: 121-130.
- [24] FAN Ch Y, WANG Y J, GONG Zh B. Detection of branch-point in light phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(11): 1388-1391 (in Chinese).
- [25] TYLER G A. Reconstruction and assessment of the least-squares and slope discrepancy component of the phase [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, A17(10): 1828-1839.
- [26] AKSENOV V, TIKHOMIROVA O. Theory of singular phase reconstruction in speckle-field [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4167: 130-137.
- [27] BANAKH V A, FALITS A V. Comparison of phase reconstruction algorithms when branch points are present [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4883: 258-264.
- [28] PRINNERMAN C A, PRIVE T R, HUMPHREYS R A, et al. Atmospheric-compensation experiments in strong-scintillation conditions [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(12): 2081-2088.
- [29] HE L P, WANG Y J, FAN Ch Y. Measurement of the phase distortion for a laser beam propagating through the atmosphere by a lateral shear interferometer [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(s1): 92-96 (in Chinese).
- [30] CHENG D J, FAN Ch Y, QIAO Ch H, et al. Detection of branch-point in laser propagation through atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(4): 241-249 (in Chinese).