宽视场湍流轮廓线测量方法研究

方玉亮[1,3**], 金振宇[1], 刘忠[1], 李正刚[1,2*]

[1]中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

[2]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

[3]中国科学院大学, 北京 100049

摘要 多层共轭自适应光学(MCAO)等技术可以有效改善湍流大气的干扰。为了 MCAO 的设计和性能优化,需要对址点的大气湍流轮廓线进行测量。基于面源目标像相对运动方差或协方差统计反演的湍流轮廓线测量方法得到的反演线性方程组需要通过离散化获得,离散化误差导致观测视场不能太大。较小的视场使方程数目受限,导致湍流轮廓线反演结果受运动方差或协方差测量误差的影响。以 PML 方法为研究实例,提出了分层积分系数矩阵方法,该方法可以显著改善离散化误差,大幅增加观测视场范围,降低协方差误差对测量结果的影响,提高湍流轮廓线的反演精度。数值模拟结果表明,基于分层积分系数矩阵的 PML 方法的视场可达到 400″,测量误差也可大幅度降低。

关键词 大气光学; 湍流轮廓线; 离散化; 反演; 系数矩阵

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201845.0804003

Wide Field of View Turbulence Profile Measurement Method

Fang Yuliang[1,3**], Jin Zhenyu[1], Liu Zhong[1], Li Zhenggang[1,2*]

[1]*Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan* 650216, *China*;

[2]*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;

[3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract The multi-conjugate adaptive optics (MCAO) can effectively reduce the disturbance of turbulent atmosphere. For the design and performance optimization of MCAO technology, it is necessary to measure the atmospheric turbulence profiles of the site. The inversion linear equations of the methods based on differential image motion variance or covariance of extended object are obtained through discretization. The discretization error causes the effective field of view (FOV) not to be very wide. A small FOV limits the number of equations, resulting in turbulence profile inversion results being affected by motion variance or covariance measurement errors. In this paper, taking the PML method as an example, we propose a layer integral coefficient matrix method. This method obviously reduces the discretization error, greatly improves the range of observation FOV, reduces the influence of the covariance error on the measurement results, and improves the accuracy of the turbulence profile inversion. The simulation results show that the FOV of the PML method using layer integral coefficient matrix can reach 400″, and the measurement error is also greatly reduced.

Key words atmospheric optics; turbulence profile; discretization; inversion; coefficient matrix

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 100.3190

1 引 言

大气湍流使传播的光波相位和振幅快速变化,导致天文望远镜成像出现模糊、畸变、闪烁和抖动等情况,这是望远镜像质衰减的主要原因。大气湍流是地基望远镜观测面临的主要问题,当望远镜口径增大到一定程度时,望远镜的空间分辨率主要受限于大气湍流。天文学家非常关注大气湍流对天文观

收稿日期: 2018-01-25; **修回日期**: 2018-03-16; **录用日期**: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(11273059,11573068)、应用光学国家重点实验室开放基金

* **E-mail**: lizg@ynao.ac.cn; ** **E-mail**: fyul@ynao.ac.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测的影响，国内外研究者提出了许多测量大气湍流的方法。早期的一些方法由于局限于当时的观测设备，只能定性地判断湍流强度，如目视望远镜衍射环法、观测星象闪烁等[1]。后来一些能够定量测量的光学方法被提出，其中的差分图像运动监视器(DIMM)[2]和太阳 DIMM(S-DIMM)[3]只能测量整个大气湍流的综合视宁度。为了增加自适应光学系统的校正视场，Beckers[4]提出了多层共轭自适应光学(MCAO)，MCAO 的设计和性能优化需要知道大气湍流轮廓线[5]。测量大气湍流轮廓线常用的方法有 MASS(multi-aperture scintillation sensor)[6]、GSM(generalized seeing monitor)[7]、SCIDAR(scintillation detection and ranging)[8]、SLODAR(slope detection and ranging)[9]等等，这些方法以恒星为观测目标。针对面源观测目标的湍流轮廓线测量方法有 S-DIMM+[10]、MASP(multiple-aperture seeing profiler)[11]、PML(profiler of moon limb)[12-14]等，面源目标可以测量到较宽视场范围的数据，从而可以提高分层分辨率和测量精度。随着技术的发展，更多的设备和技术运用于湍流的测量，如机载平台[15]和激光雷达[16]，测量湍流轮廓线的方法和技术也越来越多。其中，双孔径 PML 法可以通过对传统 S-DIMM 进行简单改造就可实现对湍流轮廓线的测量，因此本文将主要讨论如何增大传统 S-DIMM 改造的 PML 法观测视场，从而提高湍流轮廓线的反演精度。

S-DIMM+、MASP、PML 等测量方法属于间接测量方法，通过测量得到的有限数据量的像运动的方差或协方差来推演湍流强度轮廓线，需要将连续的积分关系式转化为离散求和的线性方程组，通过对该线性方程的求解得到轮廓线。这个线性方程组是严重病态的，因此只能通过模拟退火[13,17]等最优化方法求解矩阵方程来得到最优解。由于线性方程组的病态性，在没有协方差测量误差时，方程数目的多寡不会影响湍流轮廓线的反演精度。但是由于协方差测量误差的存在，更多的方程数目可以在一定程度上降低反演误差。增加方程数目的方法有两种：一是减小视场间隔，二是增加视场。望远镜分辨率和探测器角分辨率的限制使得视场间隔不可太小。另外，视场间隔太小也会使相邻视场角(FOV)的方程相关性增加，不利于线性方程组的求解。因此增加视场是更有利的方法。此外，宽视场的图像可以提供更多的数据来计算协方差。然而，分层抽样系数矩阵会产生较大的离散化误差，限制了视场的增加。如果利用分层积分方法计算系数矩阵，就可以降低离散化误差和显著增加可观测视场的范围，从而增加线性方程组的数目。本文以传统 S-DIMM 改造的 PML 方法为研究实例，采用数值模拟的方法，对分层抽样系数矩阵和分层积分系数矩阵进行比较，分析两种系数矩阵的离散化误差、可观测视场及湍流轮廓线反演精度，从而提出宽视场的湍流轮廓线反演方法。

2　PML 湍流轮廓线测量方法简介

本节简要介绍 PML 测量方法的原理，如图 1 所示，用双子孔径望远镜观测太阳或月亮的边缘，在望远镜焦面成双边缘像，测量边缘像的运动得到波前到达角 α 的起伏。视场角为 θ 的两束光波通过大气湍流后，进入间距为 B 的两个子孔径的光波差分波前到达角协方差为：

$$C_{\Delta\alpha}(\theta)=\langle[\alpha(r,\theta_0)-\alpha(r+B,\theta_0)]\times[\alpha(r,\theta_0+\theta)-\alpha(r+B,\theta_0+\theta)]\rangle,\tag{1}$$

式中：r 和 $r+B$ 为子孔径位置；θ_0 和 $\theta_0+\theta$ 为观测目标视场位置。波前到达角在边缘像上的位置对应关系如图 2 所示。采用 von Kármán 湍流模型可知差分波前到达角协方差与湍流强度表征量折算率结构常数 $C_n^2(h)$ 的关系为

$$C_{\Delta\alpha}(\theta)=\int C_n^2(h)K(\theta,h)\mathrm{d}h,\tag{2}$$

式中：h 为高度，积分区间是整个湍流大气的高度；$K(\theta,h)$ 为核函数。$K(\theta,h)$ 的表达式为

$$K(\theta,h)=1.19\int_0^\infty f^3\left[f^2+\frac{1}{L_0(h)^2}\right]^{-11/6}\times\{2\mathrm{J}_0(2\pi f\theta h)+2\mathrm{J}_2(2\pi f\theta h)-\mathrm{J}_0[2\pi f(\theta h-B)]+\cos(2\gamma)\times\mathrm{J}_2[2\pi f(\theta h-B)]-\mathrm{J}_0[2\pi f(\theta h+B)]+\cos(2\gamma)\mathrm{J}_2[2\pi f(\theta h+B)]\}\cdot\left[\frac{2\mathrm{J}_1(\pi Df)}{\pi Df}\right]^2\mathrm{d}f,\tag{3}$$

式中：f 为空间频率；D 为子孔径口径；J_n 为第一类贝塞尔函数；$L_0(h)$ 为湍流外尺度；γ 为两个视场角边缘像点连线与所统计的像点起伏方向的夹角。如图 2 所示，由于边缘像的运动在 y 轴方向上更便于测量，因此，PML 方法通过测量 y 轴方向上的波前到达角起伏来计算差分波前到达角协方差，并取 $\gamma=90°$[13]。计算差分波前到达角协方差时，通过视场定标和图像对齐等方法找到两个子孔径图像的同一像点。

实际测量时，只能测得有限的离散数据，因此将

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

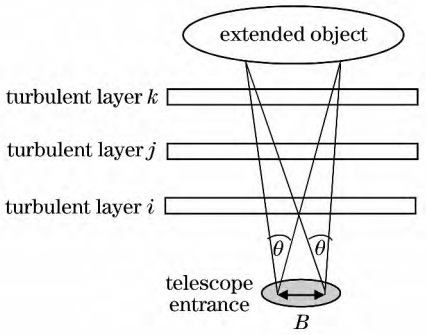

图 1　PML 原理图

Fig. 1　Schematic of PML

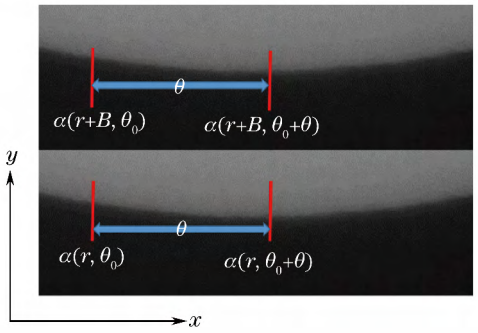

图 2　波前到达角起伏测量示意图

Fig. 2　Schematic of wave-front angle-of-arrival fluctuation measurement

(2)式转化为离散加法形式：

$$C_{\Delta\alpha}(\theta_i)=\sum_{j=1}^{N}K(\theta_i,h_j)C_n^2(h_j)\Delta_{h_j},\tag{4}$$

式中：Δ_{h_j} 为 j 层湍流层的厚度；N 为湍流层数。将(4)式写成如下线性方程组的形式：

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{AX},\tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{Y}$ 为测量得到的差分波前到达角协方差；$\boldsymbol{A}$ 为线性方程组的系数矩阵，可由核函数 $K(\theta,h)$ 计算得到；$X_j=C_n^2(h_j)\Delta_{h_j}$。(5)式是一个病态方程组，可以通过模拟退火算法反演得到湍流轮廓线。

3　模拟退火算法

模拟退火算法是一种随机搜索的全局最优算法，它最大的优点就是能够跳出局部最优找到全局最优解。湍流轮廓线反演的评价函数为

$$E=\sum_{\theta}[C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{m}}(\theta)-C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{c}}(\theta)]^2,\tag{6}$$

式中：$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{m}}(\theta)$ 为差分波前到达角协方差测量值；$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{c}}(\theta)$ 为求解得到 $C_n^2(h)$ 后由(4)式计算得到的差分波前到达角协方差。模拟退火算法通过使评价函数最小来找到最优解。模拟退火算法的主要步骤如下：

1) 初始化，设置初始温度 $T=T_0$，设置最低温度 T_e，设置降温速度 $\mathrm{d}T$，设置折算率结构常数初解 $C_n^2(h)$，设置迭代次数 L；

2) 由(4)式计算解的差分波前到达角协方差 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{c}}(\theta)$；

3) 计算差分波前到达角协方差测量值与计算值之间的偏差(评价函数)值 E；

4) 随机为 $C_n^2(h)$ 加一个随机量 δ 得到新解 $C_n'^2(h)=C_n^2(h)+\delta$；

5) 再计算新解的差分波前到达角协方差 $C_{\Delta\alpha}'^{\mathrm{c}}(\theta)$ 和评价函数值 E'；

6) 比较 E 和 E' 的大小，如果新解的评价函数值小($\mathrm{d}E=E'-E<0$)，则接受新解 $C_n^2(h)=C_n'^2(h)$，否则以随机概率条件接受新解 $C_n^2(h)=C_n'^2(h)$，接受条件为 $\exp\left(-\frac{\mathrm{d}E}{T}\right)>R$，$R$ 是在区间[0,1]内均匀分布的随机数；

7) 重复步骤(2)～(6) L 次；

8) 降温 $T=T\times\mathrm{d}T$；

9) 重复步骤(4)～(8)，直到温度下降到最低温度 $T\leqslant T_e$。

4　系数矩阵的计算方法

PML 方法是间接测量方法，实际测量的数据是差分波前到达角协方差，通过分层离散化建立线性方程组，利用模拟退火等最优化方法反演湍流轮廓线。在反演过程中系数矩阵是测量数据和湍流轮廓线的联系枢纽，如何计算系数矩阵会在一定程度上影响湍流轮廓线的测量精度。分层抽样系数矩阵在大视场下的离散化误差较大(具体分析比较见第 5 节)，因此提出了分层积分计算方法，分层积分系数矩阵离散化误差较小，可以增加观测视场，增加线性方程的数目。以下是分层抽样系数矩阵和分层积分系数矩阵计算方法的定义。

4.1　分层抽样系数矩阵

分层抽样系数矩阵以等效高度层 h_j 的核函数值 $K(\theta_i,h_i)$ 来代表高度区间在 $[h_{j-},h_{j+}]$ 湍流层的系数，分层时一般取 $h_j=(h_{j-}+h_{j+})/2$，即：

$$A_{ij}=K(\theta_i,h_j)。\tag{7}$$

分层抽样系数矩阵将 $[h_{j-},h_{j+}]$ 区间内的湍流大气理想化为一层很薄的湍流大气层。分层抽样系数矩阵的计算很简单，根据系统参数比较容易建立线性方程组。

4.2　分层积分系数矩阵

分层积分系数矩阵采用一层所有高度核函数积

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分值来表示这一层的系数：

$$A_{ij}=\frac{1}{h_{j+}-h_{j-}}\int_{h_{j-}}^{h_{j+}}K(\theta_i,h)\mathrm{d}h,\tag{8}$$

这样的系数矩阵计算方法是将$[h_{j-},h_{j+}]$区间内的湍流大气折射率结构常数 C_n^2 理想化为相同的、不随高度变化的参数。

5　系数矩阵的离散化误差

由于分层数目 N 比较小，通常为 10～30，在(2)式所示的积分形式转换为(5)式所示的离散加法形式过程中，会不可避免地产生误差。本节通过模拟计算来分析系数矩阵的离散化误差。首先模拟湍流轮廓线，再由(2)式计算理论差分波前到达角协方差 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{t}}$，然后由(5)式分别计算分层抽样系数矩阵和分层积分系数矩阵的离散差分波前到达角协方差 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{s}}$ 和 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{i}}$，最后比较 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{s}}$ 和 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{i}}$、$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{t}}$ 的偏差。

5.1　模拟过程

模拟时采用的参数分别是：望远镜子孔径 $D=0.06$ m；子孔径间距 $B=0.26$ m，这个参数是传统 S-DIMM 经常采用的参数；大气湍流外尺度 $L_0=20$ m。模拟的主要过程如下：

1）模拟连续分布的湍流轮廓线，采用 Huffnagel-Valley 湍流轮廓线

$$C_n^2(h)=C_0\left[2.2\times10^{-23}\left(\frac{h+z}{1000}\right)^{-10}\times\exp\left(-\frac{h+z}{1000}\right)+10^{-16}\exp\left(-\frac{h+z}{1000}\right)\right],\tag{9}$$

式中：湍流强度系数 $C_0=1.229$；站址高度 $z=0$。

2）给定视场角分辨率为 1″，最大视场角为 400″。

3）对大气湍流进行分层，分层情况如表 1 所示。

表 1　湍流高度分层

Table 1　Altitude grid of turbulent layer

Layer	Δ_{h_j}/m	h_j/km									
1-10	200	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9
11-18	500	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75		
19-28	1000	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
29-30	2000	17	19								

4）采用(2)式计算模拟大气湍流后的 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{t}}$，大气湍流的高度区间为 0～20 km。

5）分别计算上述分层和视场角分辨率情况下的分层抽样系数矩阵和分层积分系数矩阵，并采用(5)式分别计算 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{s}}$ 和 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{i}}$。

5.2　模拟结果

首先考察不同视场角时核函数随高度变化的情况，图 3 展示了视场角为 10″、50″、100″和 200″时核函数随高度变化的情况。在不同的视场角下，核函数有一个极小值，其高度恰好是交叉光波(图 1)重合的高度。从近地面到极小值高度的两倍高度范围内，核函数随高度的变化比较快，并且视场角越大，其变化越剧烈。核函数变化的剧烈程度就是产生离散化误差的主要来源。

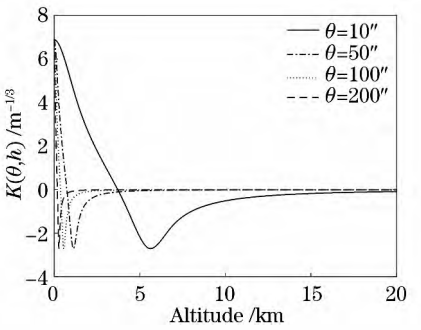

图 3　PML 核函数随高度变化的曲线

Fig. 3　Variation of PML kernels function with height

模拟计算的差分波前到达角协方差如图 4 所示，图 4(a)是视场角在 1″～400″范围内的结果，图 4(b)是视场角在 50″～400″范围内的结果。模拟结果表明：差分波前到达角协方差随着视场角增大而迅速衰减；在 1″～100″范围内，$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{s}}$、$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{i}}$ 与理论值相差很小；超过 100″以后，$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{i}}$ 与理论值的误差依然很小，而 $C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{s}}$ 与理论值的差异逐渐增大，甚至在某些角度出现了负值。可见，与分层抽样系数矩阵相比，分层积分系数矩阵能够减小大视场的离散化误差。

6　湍流轮廓线反演模拟实验

本节通过模拟实验来对比分层抽样系数矩阵和分层积分系数矩阵对湍流轮廓线反演精度的影响。大视场的差分波前到达角协方差非常小，而测量数据存在信噪比低的问题，通过模拟实验研究低信噪比的大视场差分波前到达角协方差数据对反演的影响。湍流轮廓线、差分波前到达角协方差、系数矩阵的模拟计算同第 5 节，但是反演所用的差分波前到达角协方差是(2)式计算的$C_{\Delta\alpha}^{\mathrm{t}}$。计算得到系数矩

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

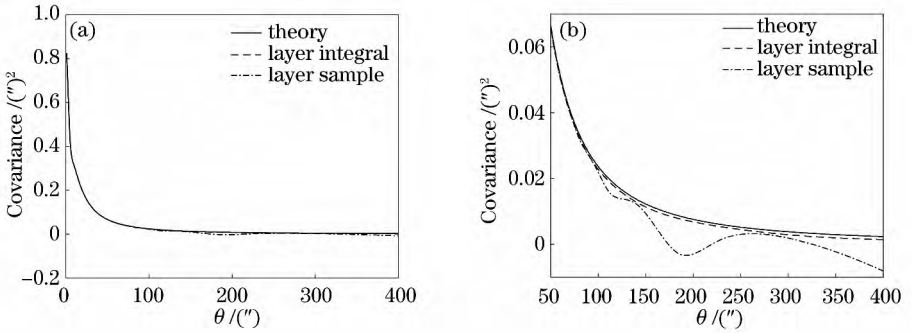

图 4　模拟计算的差分波前到达角协方差。(a)视场角范围为 1″～400″;(b)视场角范围为 50″～400″

Fig. 4　Covariance of wave-front arrive angle calculated by simulation. (a) FOV range is 1″-400″; (b) FOV range is 50″-400″

阵和差分波前到达角协方差后，可以列出线性方程组，然后通过模拟退火算法求解方程组，进而反演出湍流轮廓线。PML 方法最大的误差来源是边缘检测误差[14-15]，在加入边缘检测误差和不加边缘检测误差时分别采用分层积分系数矩阵和分层抽样系数矩阵反演湍流轮廓线。

6.1　边缘检测误差

假设实际测得的波前到达角为：

$$\alpha = \alpha_0 + e, \tag{10}$$

式中：α_0 为无误差的真实值；e 为测量误差。则由(1)式得到测得的差分波前到达角协方差为

$$C_{\Delta\alpha}(\theta) = C^{\mathrm{t}}_{\Delta\alpha}(\theta) + C_{ae1} + C_{ae2} + C_{\Delta e}, \tag{11}$$

差分波前到达角协方差的真实值 $C^{\mathrm{t}}_{\Delta\alpha}(\theta)$ 的公式为

$$C^{\mathrm{t}}_{\Delta\alpha}(\theta) = \langle[\alpha_0(r,\theta_0) - \alpha_0(r+B,\theta_0)] \times [\alpha_0(r,\theta_0+\theta) - \alpha_0(r+B,\theta_0+\theta)]\rangle, \tag{12}$$

差分波前到达角和差分误差之间的协方差 C_{ae1} 和 C_{ae2} 的公式为

$$C_{ae1} = \langle[\alpha_0(r,\theta_0) - \alpha_0(r+B,\theta_0)] \times [e(r,\theta_0+\theta) - e(r+B,\theta_0+\theta)]\rangle, \tag{13}$$

$$C_{ae2} = \langle[\alpha_0(r,\theta_0) - \alpha_0(r+B,\theta_0)] \times [e(r,\theta_0+\theta) - e(r+B,\theta_0+\theta)]\rangle, \tag{14}$$

差分误差的协方差 $C_{\Delta e}$ 的公式为：

$$C_{\Delta e} = \langle[e(r,\theta_0) - e(r+B,\theta_0)] \times [e(r,\theta_0+\theta) - e(r+B,\theta_0+\theta)]\rangle。 \tag{15}$$

由于差分波前到达角和差分误差之间相互独立，所以 C_{ae_1} 和 C_{ae_2} 为 0。因此在模拟时只需要加入 $C_{\Delta e}$。不同视场角和不同子孔径的波前到达角测量误差的均方根(RMS)相等，因此在模拟实验中，不同视场所加噪声的 RMS 相等，测量误差服从 0 均值的高斯统计。

6.2　湍流轮廓线反演结果

湍流轮廓线反演结果如图 5 所示，实线是用作比较的模拟的湍流轮廓线，用分层积分系数矩阵反演时采用了 1″～400″视场范围的数据，用分层抽样系数矩阵反演时分别采用了 1″～100″和 1″～400″视场范围的数据，图 5(a)、(b)、(c)分别是边缘测量误差 RMS 分别为 0、0.1″、0.2″时的反演结果。在不同的测量误差下，宽视场的分层积分系数矩阵的反演结果总体上都优于分层抽样系数矩阵的反演结果。为不失一般性，定量分析了不同系数矩阵对反演结果的影响，分别进行了 20 次反演模拟，然后统计反演结果与理论模拟值偏离的相对方差。本研究中，相对方差定义为

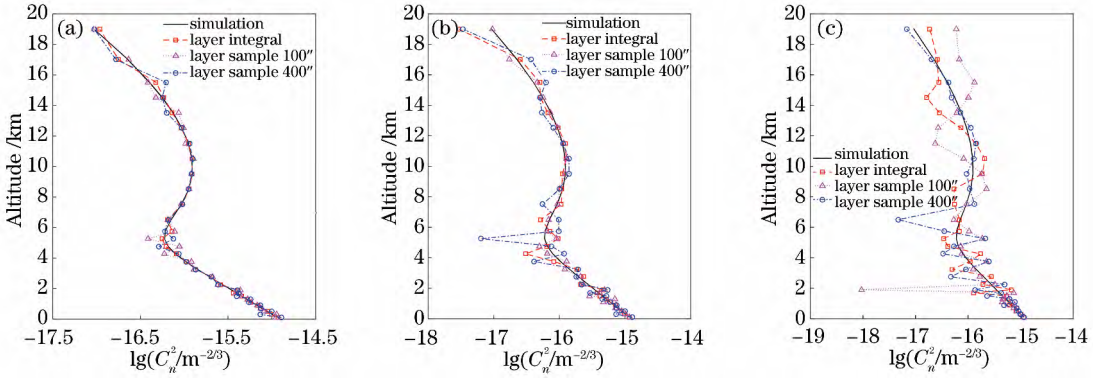

图 5　湍流轮廓线反演结果。(a)边缘检测误差 RMS 为 0;(b)边缘检测误差 RMS 为 0.1″;(c)边缘检测误差 RMS 为 0.2″

Fig. 5　Inversion results of turbulent profiler. (a) RMS of edge detection error is 0; (b) RMS of edge detection error is 0.1″; RMS of edge detection error is (c) 0.2″

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$v=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{C_i-C_{\mathrm{sim}}}{C_{\mathrm{sim}}}\right)^2, \tag{16}$$

式中：N 为总的反演次数；C_i 为第 i 次的反演结果；C_{sim} 为理论模拟值。相对方差可以比较直观地反映反演结果与理论模拟值的偏离程度，结果如图 6 所示：分层抽样系数矩阵在 1″～100″视场范围内的离散化误差较小，在 100″～400″视场范围内的离散化误差较大；离散化误差会导致反演误差，不同测量误差下宽视场的分层抽样系数矩阵反演结果的相对方差都最大；在没有边缘测量误差时，窄视场的分层抽样系数矩阵反演结果与宽视场的分层积分系数矩阵的反演结果相当，或稍逊于宽视场分层积分系数矩阵的反演结果，但随着边缘测量误差的增加，窄视场反演结果的相对方差比宽视场要大很多。虽然大视场的差分波前到达角协方差数据的信噪比低，但是增加大视场数据能够减小随机误差对湍流轮廓线反演的影响。因此采用分层积分系数矩阵可以在更大的视场角范围内建立更多的线性方程组，从而降低随机误差对湍流轮廓线反演精度的影响。

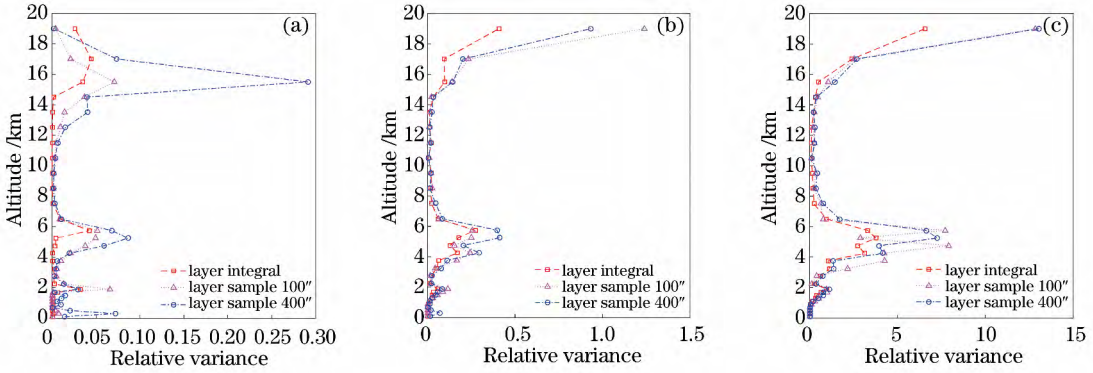

图 6　反演结果的相对方差。(a)边缘检测误差 RMS 为 0；(b)边缘检测误差 RMS 为 0.1″；(c)边缘检测误差 RMS 为 0.2″

Fig. 6　Relative variance of inversion result. (a) RMS of edge detection error is 0; (b) RMS of edge detection error is 0.1″; (c) RMS of edge detection error is 0.2″

7　结　　论

由于湍流大气分层数目有限，线性方程组的系数矩阵会产生离散化误差，从而影响湍流轮廓线测量方法的湍流轮廓线反演精度。以传统 S-DIMM 光学参数下的 PML 方法为研究实例，利用数值模拟对分层抽样系数矩阵和分层积分系数矩阵的离散化误差和湍流轮廓线反演精度进行比较。结果表明，在较大视场角时，分层积分系数矩阵的离散化误差远小于分层抽样系数矩阵，这意味着分层积分系数矩阵能在更大的视场角范围内建立线性方程组，从而可以建立更多的线性方程组。继而利用数值模拟对比了两种系数矩阵和宽窄视场的反演误差。模拟结果表明：分层积分系数矩阵的反演误差均小于分层抽样矩阵；虽然大视场的差分波前到达角协方差数据的信噪比低，但增加大视场数据能够减小随机误差对湍流轮廓线的影响。因此，采用分层积分系数矩阵可以增加观测视场，减小随机误差对反演的影响，从而提高湍流轮廓线的测量精度。

参　考　文　献

[1] Hou J L. Site test parameters and their measurements[J]. Progress in Astronomy, 1994(2): 126-132.
侯金良. 天文选址的主要参数及测量方法[J]. 天文学进展, 1994(2): 126-132.

[2] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. Astronomy & Astrophysics, 1990, 227(1): 294-300.

[3] Liu Z, Beckers J M. Comparative solar seeing and scintillation studies at the Fuxian Lake Solar Station [J]. Solar Physics, 2001, 198(1): 197-209.

[4] Beckers J M. Increasing the size of the isoplanatic patch with multiconjugate adaptive optics [J]. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, 1988, 2: 693-703.

[5] Berkefeld T, Soltau D. EST adaptive optics performance estimations [J]. Astronomische Nachrichten, 2010, 331(6): 640-643.

[6] Kornilov V, Tokovinin A A, Vozyakova O, *et al*. MASS: a monitor of the vertical turbulence distribution[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4839(2): 837-845.

[7] Martin F, Tokovinin A, Agabi A, *et al*. G.S.M.: a grating scale monitor for atmospheric turbulence measurements. I. The instrument and first results of angle of arrival measurements [J]. Astronomy &

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Astrophysics Supplement, 1995, 108: 173-180.

[8] Fuchs A, Tallon M, Vernin J. Focusing on a turbulent layer: principle of the "generalized SCIDAR" [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1998, 110(743): 86-91.

[9] Wilson R W. SLODAR: measuring optical turbulence altitude with a Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, 337(1): 103-108.

[10] Scharmer G B, Werkhoven T I M V. S-DIMM+height characterization of day-time seeing using solar granulation[J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 513(4): 757-762.

[11] Zhao G, Ren D. Multiple-aperture based solar seeing profiler[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127(955): 870-879.

[12] Ziad A, Blary F, Borgnino J, *et al*. First results of the PML monitor of atmospheric turbulence profile with high vertical resolution [J]. Astronomy & Astrophysics, 2013, 559(11): L6.

[13] Catala L, Ziad A, Fanteïcaujolle Y, *et al*. High-resolution altitude profiles of the atmospheric turbulence with PML at the Sutherland Observatory [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 467(3): 3699-3711.

[14] Blary F, Ziad A, Borgnino J, *et al*. Monitoring atmospheric turbulence profiles with high vertical resolution using PML/PBL instrument [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91453H.

[15] Zhang L, Zhao X, Tong S F, *et al*. Measurement of atmospheric turbulence parameters on airborne platform based on differential image motion method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0304002.

张雷, 赵馨, 佟首峰, 等. 基于差分像运动法的机载平台大气湍流参数测量[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0304002.

[16] Cheng Z, He F, Jing X, *et al*. Improved retrieval method of turbulence profile from differential column image motion light detection and ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0401004.

程知, 何枫, 靖旭, 等. 改进的差分光柱像运动激光雷达的湍流廓线反演方法[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0401004.

[17] Maire J, Ziad A, Borgnino J, *et al*. Measurements of profiles of the wavefront outer scale using observations of the limb of the moon[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 377(3): 1236-1244.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net