

大气湍流三维波前探测模式层析算法分析*

张兰强¹⁾²⁾³⁾ 顾乃庭¹⁾²⁾ 饶长辉^{1)2)†}

1) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年2月27日收到; 2013年4月27日收到修改稿)

大气湍流三维波前探测是实现多层共轭自适应光学技术的关键和前提. 对湍流三维波前探测中最常用的模式层析技术进行理论研究与分析, 提出该算法存在原理性限制, 并基于此对模式层析技术产生误差的原因展开分析, 最后针对不同类型的模式层析重构误差给出数值仿真实验结果. 分析表明, 模式层析重构中使用了 Zernike 分解基的一部分作为新的分解基进行波面拟合, 从而引入模式混淆和模式耦合两个方面的误差; 部分 Zernike 分解基不相关是避免模式混淆误差的必要条件, 模式耦合误差则无法避免. 最后结合仿真结果提出大视场探测、小区域重构的方法, 很好地抑制了模式耦合误差.

关键词: 三维波前探测, 大气层析, 模式法, 误差分析

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.-d, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.62.169501

1 引言

多层共轭自适应光学 (multi-conjugate adaptive optics, MCAO)^[1,2] 技术近年来逐渐成为自适应光学领域研究的重点和趋势. 大气湍流三维波前探测是 MCAO 技术的关键与前提, 该技术首先针对探测视场内不同位置导引星 (guide star, GS) 同时进行波前探测, 得到不同视线方向上湍流累积的波前信息, 再利用层析算法求解不同高度湍流层引起的波前像差, 最终得到三维分布的湍流波前信息, 如图 1(a) 所示. 目前主要有区域法层析技术^[3] 和模式法层析技术^[4] 两种方法实现大气湍流三维波前探测. 区域法层析技术建立在一定假设的基础之上, 很难与实际条件相符合, 从而限制了该方法的应用. 模式层析技术避免了这些假设, 使得它在提出后成为层析技术研究的重点.

模式法层析技术自提出后, 国内外开展了不少理论分析与实验研究, 文献 [5] 通过开展对空观测实验, 首次证明了该技术理论上的正确性,

文献 [6, 7] 对模式层析技术和基于最小均方根预测算法进行对比研究, 并提出暗模式 (unseen modes) 的概念, 指出模式层析技术探测精度有限. 文献 [8] 分析了层析算法的频域特性, 得出算法重构精度受噪声影响较为严重. 以上研究工作虽然多次探讨模式法层析技术的精度, 但是都没有对误差产生的原因展开分析. 本文从模式法层析技术的原理入手, 理论上推导模式层析算法存在的不足, 着重分析模式法层析技术误差的来源, 指出模式层析重构误差主要由模式混淆和模式耦合两部分组成, 并且得出保证模式层析重构精度的必要条件.

2 模式法层析技术基础

由于波前探测器共轭于入瞳, 因此不同视线方向波前探测得到的是整个路径上湍流累积的波前像差^[9], 而分层校正需要对不同高度湍流层引起的波前像差进行校正, 由不同视线方向累积湍流信息得到不同高度层湍流信息的技术被称为大气层析技术^[10].

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11178004) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chrao@ioe.ac.cn

如图 1(b) 所示, 令大区域 Ω 表示某一高度湍流层探测视场内的面积, 小区域 Ω_s 表示某一视线方向上波前探测在该层上截取的探测面积, 令大区域直径为 D , 小区域 Ω_s 直径为 d , 在大区域 Ω 内波前相位表示为 $\phi(\mathbf{R})$, 小区域 Ω_s 内的波前相位表示为 $\phi(\mathbf{r})$, \mathbf{R} 与 \mathbf{r} 分别表示以两个区域中心为坐标原点的二维坐标, 大小区域内坐标间的关系为 $\mathbf{R} = \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$. 小区域内波面可表示为

$$\phi(\mathbf{r}) = \sum_{j=4}^N a_j z_j \left(\frac{\mathbf{r}}{d} \right) = \sum_{i=4}^N A_i Z_i \left(\frac{\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}}{D} \right), \quad (1)$$

式中 a_j 和 A_i 分别表示小区域和大区域内归一化 Zernike 分解系数, z_j 和 Z_i 为相应区域内归一化的第 i 和第 j 阶分解基. 由于自适应光学系统无法探测波前平移像差 (第 1 阶), 波前倾斜像差 (第 2, 3 阶) 由跟踪子系统单独闭环校正, 在以下大气层析重构分析中均不考虑前 3 阶 Zernike 像差.

根据 Ragazzoni 在文献 [4] 中的结论, 大区域 Ω 内第 i ($i > 3$) 阶 Zernike 基被小区域 Ω_s 截取的部分与小区域 Ω_s 内归一化 Zernike 基之间有如下关系:

$$Z_i \left(\frac{\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}}{D} \right) = \sum_{j=4}^i P_{i,j} z_j \left(\frac{\mathbf{r}}{d} \right). \quad (2)$$

联合 (1) 式和 (2) 式, 大小区域内对应的 Zernike 系数可以表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{P} \times \mathbf{A}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{a} = [a_4, a_5, \dots, a_N]^T$, $\mathbf{A} = [A_4, A_5, \dots, A_N]^T$,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{4,4} & 0 & \dots & 0 \\ P_{5,4} & P_{5,5} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,4} & P_{N,5} & \dots & P_{N,N} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

\mathbf{P} 称为关系矩阵, N 为模式重构阶数. 利用探测到小区域内的波面, 对关系矩阵 \mathbf{P} 求广义逆, 由 (4) 式即可得到大区域内的波面 Zernike 系数:

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}^+ \times \mathbf{a}, \quad (5)$$

\mathbf{P}^+ 称为模式重构矩阵, 上标 + 表示广义逆, 关系矩阵 \mathbf{P} 只与子区域的大小和相对位置有关. (5) 式是单个导引星探测单层大气湍流的情况, 针对实际大气湍流三维波前探测中多个导引星探测多层大气湍流的情况, 上式可表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}_{\text{total}}^+ \times \mathbf{a}, \quad (6)$$

式中,

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1^T, \mathbf{A}_2^T, \dots, \mathbf{A}_{N_{\text{TL}}}^T]^T, \quad \mathbf{a} = [\mathbf{a}_1^T, \mathbf{a}_2^T, \dots, \mathbf{a}_{N_{\text{GS}}}^T]^T,$$

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,N_{\text{TL}}} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,N_{\text{TL}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N_{\text{GS}},1} & P_{N_{\text{GS}},2} & \dots & P_{N_{\text{GS}},N_{\text{TL}}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

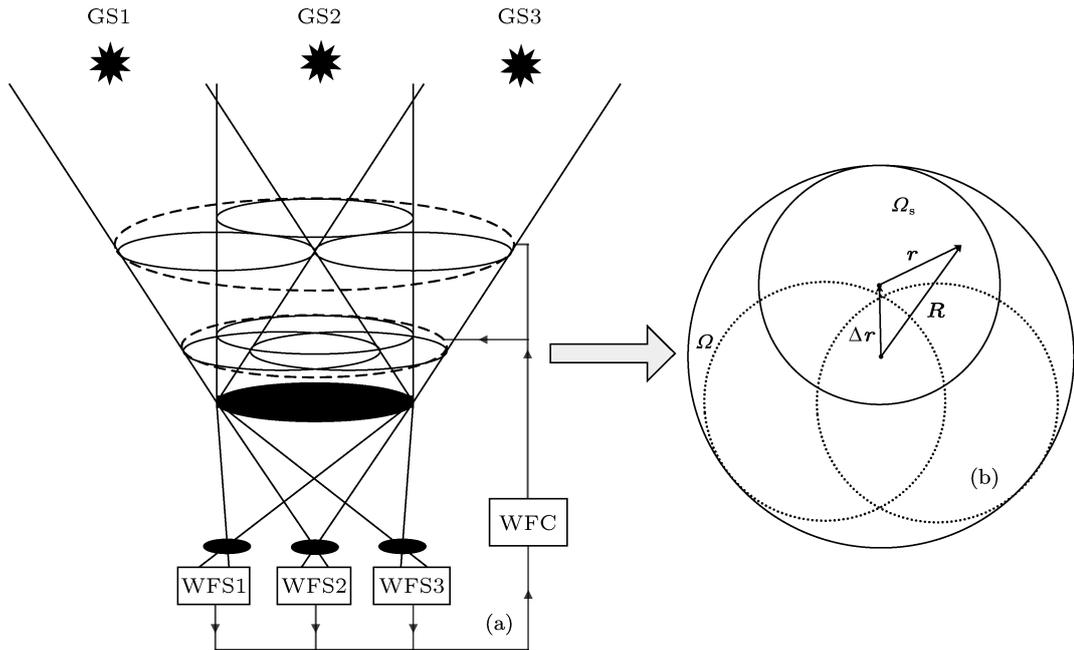


图 1 三维波前探测示意图 (a) 三个视线方向上进行波前探测, 每个视线方向对应一个导引星; (b) 对应探测视场内某一高度层湍流与不同视线方向导引星探测区域相对位置

在确定了湍流分层数 N_{TL} , 导引星个数 N_{GS} 和探测视场以及湍流层高度后, 根据 (2) 式即可求解关系矩阵 P .

3 模式层析算法分析

由 (2) 式可以看出, 关系矩阵 P 中的元素 $P_{i,j}$ 实际上是大区域第 i 阶 Zernike 基 $Z_i(\mathbf{x})$ 的一部分被该区域内归一化的第 j 阶 Zernike 基 $z_j(\mathbf{x})$ 进行分解的系数. 假设大区域内不同阶 Zernike 基 $Z_i(\mathbf{x})$ 的一部分可以作为新的分解基, 并记为 $\mathcal{Z} = (\mathcal{Z}_1(\mathbf{x}), \mathcal{Z}_2(\mathbf{x}), \dots, \mathcal{Z}_i(\mathbf{x}), \dots, \mathcal{Z}_N(\mathbf{x}))$, 如图 2 所示. (2) 式可写为

$$\mathcal{Z} = Pz, \quad (8)$$

$z = (z_1(\mathbf{x}), z_2(\mathbf{x}), \dots, z_j(\mathbf{x}), \dots, z_N(\mathbf{x}))$ 为小区域内归一化 Zernike 基, 关系矩阵 P 反映的是分解基 \mathcal{Z} 与小区域内 Zernike 基 z 之间的关系, 如此则 (5) 式得到的分解系数 A 实际上是小区域内波前基于分解基 \mathcal{Z} 的分解系数, 并不是基于大区域内归一化 Zernike 基 Z 的模式分解系数. 部分 Zernike 基能否作为新的分解基需要进一步考证, 也是产生模式层析重构误差的根源.

4 模式层析误差分析

自适应光学技术模式法波前复原中, 通常将模式误差分为模式混淆误差和模式耦合误差两个方面^[11]. 模式层析技术中, 同样可以根据误差的来源

不同对误差进行分类, 由部分 Zernike 分解基本身具有相关性导致低阶模式相互解释引起的误差, 称为模式混淆误差, 由部分 Zernike 分解基非正交性导致高阶模式解释为低阶模式引起的误差, 称为模式耦合误差.

4.1 模式混淆误差

先讨论低阶模式之间相互解释引起的波前像差, 即初始相位屏可以被不超过 N_{re} 阶 Zernike 多项式完全拟合, N_{re} 为模式重构阶数. 通常情况下, 一组向量组作为分解基的充要条件是各项之间彼此正交. 文献 [12] 的分析指出, 在夏克-哈特曼波前传感器应用模式法进行波前测量或波前校正的过程中, 模式之间的正交性并不是算法实现的必要条件, 只要模式之间不相关即可保证重构精度. 对于不存在高于重构阶数像差的情况下, 只要保证部分 Zernike 基之间不相关, 即可确保重构精度. 为此我们讨论部分 Zernike 基 \mathcal{Z} 彼此之间不相关的限制条件.

由于部分 Zernike 基 \mathcal{Z} 与小区域位置有关, 无法给出具体的解析表达式. 由 (8) 式可知关系矩阵 P 反映的是新模式分解基 \mathcal{Z} 与其对应区域内归一化 Zernike 分解基 z 之间的关系, 向量组 z 彼此正交, 由线性代数知识易知, 若要 \mathcal{Z} 彼此线性无关, 则要求关系矩阵 P 可逆或满秩. 否则不同阶分解基向量 \mathcal{Z} 之间线性相关, 引起模式混淆误差. 由此可通过关系矩阵 P 是否满秩来判断模式层析重构中是否引入了模式混淆误差.

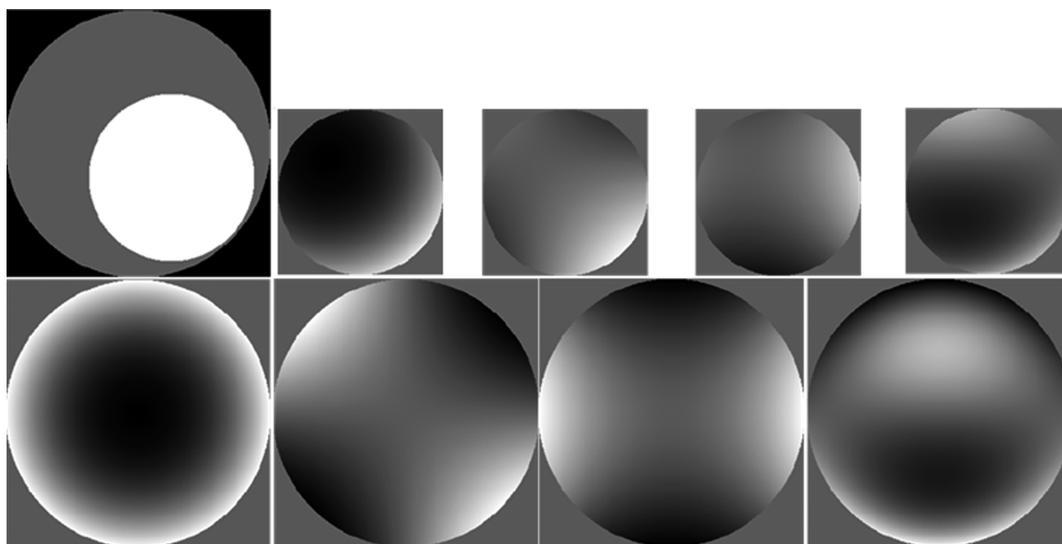


图 2 小区域相对位置及其对应的新的模式分解基 \mathcal{Z} 左上为小区域相对位置, 上排由左至右分别为 4—7 阶部分 Zernike 模式分解基, 下排是与之对应的 4—7 阶 Zernike 模式分解基

4.2 模式耦合误差

进一步分析初始相位屏中包含高于重构阶数像差的情况. 令初始相位屏需要 N_{ini} 阶 Zernike 模式进行分解, 且 $N_{\text{ini}} = N_{\text{re}} + N_{\text{H}}$, N_{H} 为高于模式重构阶数的像差阶数, 初始波面 $\phi(\mathbf{x}) = \phi_{N_{\text{re}}}(\mathbf{x}) + \phi_{N_{\text{H}}}(\mathbf{x})$, 其对应小区域内探测波前:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(\mathbf{x}) &= \phi_{N_{\text{re}}}(\mathbf{x}) + \phi_{N_{\text{H}}}(\mathbf{x}) \\ &= \sum_{j=4}^{N_{\text{re}}} a_{j,\text{re}} z_j + \sum_{j=4}^{N_{\text{H}}} a_{j,\text{H}} z_j \\ &= \sum_{j=4}^{N_{\text{re}}} (a_{j,\text{re}} + a_{j,\text{H}}^L) z_j + \sum_{j=N_{\text{re}}+1}^{N_{\text{H}}} a_{j,\text{H}}^H z_j, \quad (9) \end{aligned}$$

此时小区域内探测到的第 j 阶模式系数 $a_j = a_{j,\text{re}} + a_{j,\text{H}}^L$, ($j \in (4, N_{\text{re}})$), 包括大区域内低阶 Zernike 像差在小区域内进行分解的系数 $a_{j,\text{re}}$ 和大区域内高阶 Zernike 像差 $\phi_{N_{\text{H}}}(\mathbf{x})$ 在小区域内进行模式分解的低阶成分 $a_{j,\text{H}}^L$, 该项由部分 Zernike 基非正交性引起, 相当于探测噪声. 只要初始相位屏存在高于重构阶数的波前像差, 探测模式系数中就一定存在 $a_{j,\text{H}}^L$ 项, 此时即使关系矩阵 \mathbf{P} 满秩, 利用 (5) 式也将无法准确地得到大区域内低阶 Zernike 系数.

5 层析算法仿真分析

5.1 模式混淆误差的影响

仿真分析中利用波前残差的相对均方根 (RMS) 值反映层析重构的精度:

$$\begin{aligned} RMS_{\text{ave}} &= \left\langle \left[\frac{1}{S} \iint_S (\phi_k(\mathbf{r}) - \hat{\phi}_k(\mathbf{r}))^2 d\mathbf{r} \right]^{1/2} \right. \\ &\quad \left. \times \left[\frac{1}{S} \iint_S \phi_k^2(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right]^{-1/2} \right\rangle_n, \quad (10) \end{aligned}$$

$\phi_k(\mathbf{r})$ 和 $\hat{\phi}_k(\mathbf{r})$ 分别为第 k 帧初始相位屏和重构相位屏, 仿真中初始相位屏 $\phi_k(\mathbf{r})$ 中包含倾斜项, 但是层析重构假设对倾斜完美校正, $\langle \rangle_n$ 表示对 n 帧相位屏计算结果统计平均. RMS_{ave} 越小, 波前重构精度越高.

首先对单层且不含有高于重构模式阶数像差的初始相位屏进行模式层析重构, 验证模式混淆误差对层析重构的影响. 初始相位屏用 65 阶符合科尔莫哥诺夫谱的 Zernike 多项式拟合生成^[13], 湍流强度 $D/r_0 = 15$, 共 300 帧随机相位屏用于计算不同情况下的平均模式重构精度. 仿真中导引星均匀

分布在探测全视场或半视场区域, 具体排布如图 3 所示.

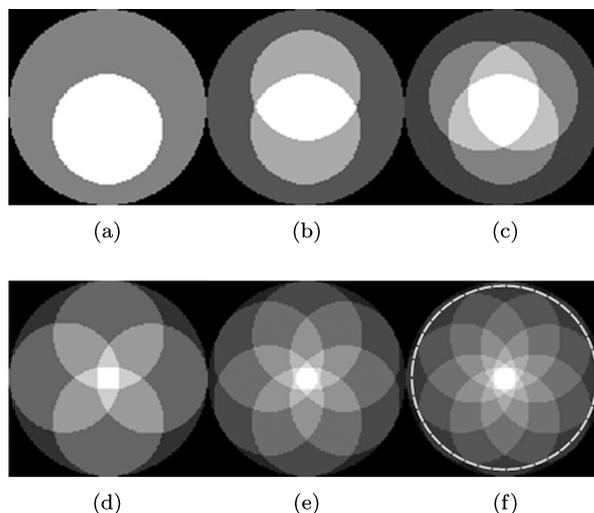


图 3 不同导引星数目及其排布 (a) 1 GS; (b) 2 GSs; (c) 3 GSs; (d) 4 GSs; (e) 6 GSs; (f) 8 GSs

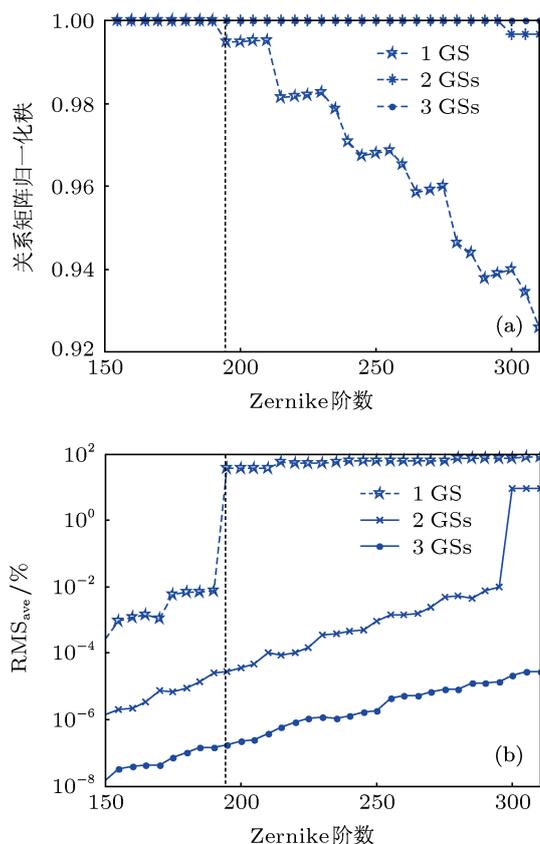


图 4 重构阶数对关系矩阵归一化秩以及相对重构残差的影响 (a) 重构阶数与关系矩阵 \mathbf{P} 归一化秩的关系; (b) 重构阶数与相对重构残差的关系

针对导引星数目分别为 1, 2, 3 (其排布如图 3(a)—(c) 所示), 仿真计算了不同阶数 Zernike 模式

进行层析重构的结果, 假设关系矩阵为一 $M \times N$ 矩阵, 定义归一化秩为

$$ra = \frac{\text{rank}(\mathbf{P})}{\min\{M, N\}}, \quad (11)$$

式中 $\text{rank}(\cdot)$ 表示计算矩阵的秩, $\min\{\cdot\}$ 取最小值. 图 4 中分别给出了不同导引星数目情况下, 归一化秩以及重构精度与重构阶数的关系. 图中可以看出, 随着重构阶数的增加, 关系矩阵 \mathbf{P} 的归一化秩越来越小, 说明部分 Zernike 基的相关性逐渐增强. 对比图 4(a), (b) 可以看出, 一旦关系矩阵 \mathbf{P} 不满秩, 层析重构精度迅速降低. 由此可以说明, 对于只层析重构低阶像差时, 层析重构模式阶数并非越高越好; 部分 Zernike 基不相关是确保模式层析重构准确的必要条件.

5.2 模式耦合误差对层析重构精度的影响

若初始相位屏存在高阶像差, 理论分析表明即使关系矩阵 \mathbf{P} 满秩, 也会产生较大的层析重构误差. 为提高重构精度, 仿真实验中增加导引星数量至 4, 6, 8 颗, 具体排布如图 3(d)—(f) 所示, 利用 78, 105, 136, 231 阶 Zernike 多项式 (对应径向 Zernike 阶数分别为 11, 13, 15, 20) 分别拟合生成 300 帧随机相位屏, 固定使用 65 阶 Zernike 模式层析重构, 计算高阶湍流对重构精度的影响. 由于模式层析技术只重构低阶像差, 而初始相位屏中含有高阶像差, 为了更好地衡量重构精度, 定义低阶像差重构相对残差作为重构精度的衡量指标:

$$RMS_{\text{ave}}^{\text{cut}} = \left\langle \left[\frac{1}{S} \iint_S (\hat{\phi}_k(\mathbf{r}) - \phi_{k, N_{\text{re}}}(\mathbf{r}))^2 d\mathbf{r} \right]^{1/2} \times \left[\frac{1}{S} \iint_S \phi_{k, N_{\text{re}}}^2(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \right]^{1/2} \right\rangle_n, \quad (12)$$

式中, $\phi_{k, N_{\text{re}}}(\mathbf{r})$ 为第 k 帧初始相位屏中不高于 N_{re} 阶的低阶像差, N_{re} 表示重构阶数.

仿真结果如图 5 所示. 图 5(a) 表示不同阶初始相位屏重构平均相对残差, 图 5(b) 给出四颗导引星时某帧相位屏重构残差. 从图中可以看出, 当初始相位屏不含有高于重构阶数的模式像差时, 层析重构非常准确, 导引星数和初始相位屏的模式阶数都会影响模式层析重构的精度, 当导引星数目不足时, 模式层析重构的精度受相位屏中的高阶模式影响较大; 随着导引星数的增加, 其重构精度越来越高, 当导引星个数达到一定数目时, 其重构精度几乎不受初始相位屏阶数的影响.

对比图 3 中导引星位置排布和图 5(b) 可以看出, 波前重构残差主要集中在导引星未覆盖的边缘位置, 4 导引星时, 视场内波面覆盖区域有限, 因此重构残差较大, 而 6 至 8 颗导引星几乎覆盖了探测视场内所有区域, 其重构残差也相应较小, 在波前探测时, 若能进行较大视场探测, 较小视场重构, 保证重构视场内区域均有导引星覆盖, 必将有助于提高模式层析算法的重构精度. 为说明大区域探测、小区域重构的有效性, 进一步仿真分析了重构探测视场中心 88% 的区域 (对应 8 导引星完全覆盖的视场), 具体重构区域如图 3 中虚线区域内所示, 仿真结果如图 6 所示. 图中可以看出, 小区域重构可以明显提高重构精度. 图 7 给出了 4 导引星探测利用 65 阶 Zernike 模式层析重构 231 阶初始相位屏时, 重构精度随重构视场的变化. 在仿真条件下 4 导引星可以完全覆盖约 49% 的探测视场, 图 7 中虚线位置在导引星完全覆盖的视场范围内, 模式层析精度较高, 随着探测视场内导引星未覆盖区域的增加, 层析重构精度逐渐下降.

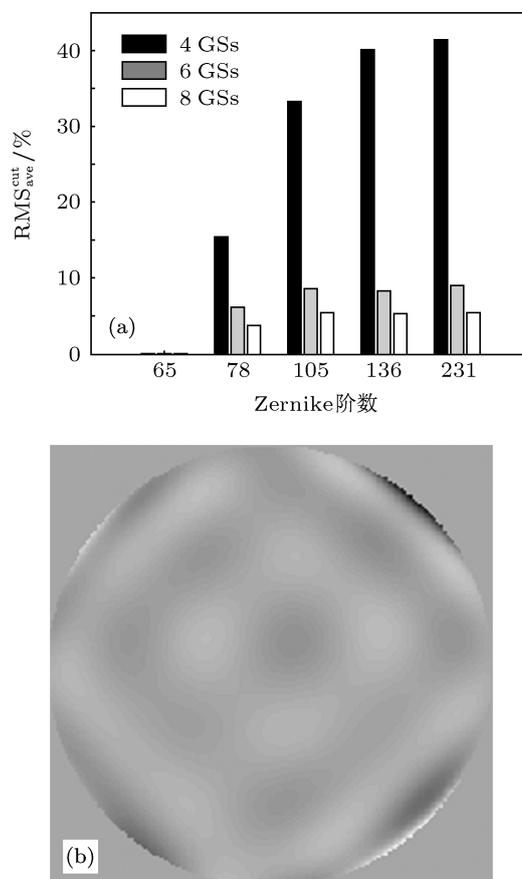


图 5 65 阶模式层析重构不同阶次相位屏模式耦合对重构精度的影响 (a) 重构精度与导引星个数、初始相位屏中高阶像差之间的关系; (b) 典型的层析重构残差

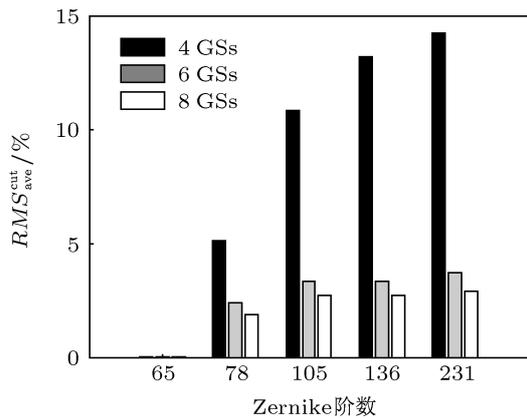


图6 65阶重构全视场88%区域内波前残差

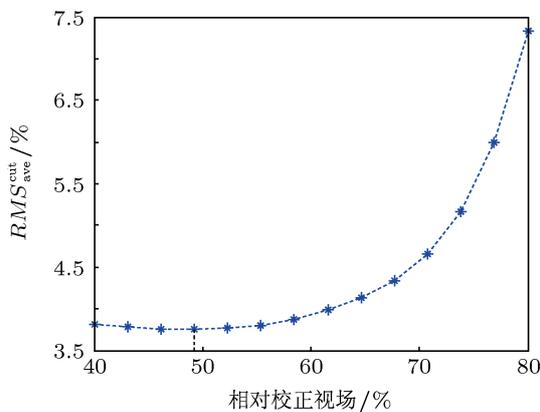


图7 4导引星重构精度与视场之间的关系

上述结论可以看出, 要保证模式层析重构的精度, 需要足够多个导引星覆盖探测高度上视场范围内的湍流波前信息, 国外主要针对 8 m 级望远镜展开分析, 一般 3—5 颗导引星即可满足要求, 对于本文分析的 2 m 级小口径望远镜, 要保证层析精度, 需要的导引星数也有所增加^[14].

6 结论

本文在简述模式法层析技术基本原理的基础上, 提出了该算法存在的原理性限制, 并基于此进一步分析了模式法层析技术产生误差的原因, 最后针对不同类型的误差进行数值仿真. 分析指出, 模式层析重构中使用了 Zernike 基的一部分作为分解基, 由于部分 Zernike 基不具备正交完备性, 模式层析算法会引入模式混淆和模式耦合两种波前误差; 保证部分 Zernike 基不相关即可避免模式混淆误差, 而模式耦合误差不可避免, 只能抑制其影响. 仿真结果表明, 模式耦合误差受到导引星数目和初始相位屏模式阶数两个方面的影响, 在导引星数目一定的情况下, 采取较大视场探测, 较小视场重构的方式, 可以很好地抑制模式耦合误差.

感谢中国科学院光电技术研究所朱磊副研究员、刘文劲同学、李斐学长和宁禹、王建新在课题研究和论文写作中进行的多次交流及给出的十分有益的意见和建议.

- [1] Beckers J M 1988 *In ESO Conference on Very Large Telescopes and Their Implementation European Southern Observatory Garching, Germany*, March 21–24, 1988 p693
- [2] Beckers J M 1989 *Proc. SPIE* **1114** 215
- [3] Tallom M, Foy R 1990 *Astron. Astrophys.* **235** 549
- [4] Ragazzoni R, Marchetti E, Rigaut F 1999 *Astron. Astrophys.* **342** L53
- [5] Ragazzoni R, Marchetti E, Valente G 2000 *Nature* **403** 54
- [6] Fusco T, Conan J M, Michau V, Rousset G, Assemat F 2001 *Proc. SPIE* **4167** 168
- [7] Tokovinin A, Louarn M L, Viard E, Hubin N, Conan R 2001 *Astron. Astrophys.* **378** 710
- [8] Tokovinin A, Viard E 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 873
- [9] Li C H, Xian H, Jiang W H, Rao C H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4289 (in Chinese) [李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 饶长辉 2007 物理学报 **56** 4289]
- [10] Fusco T, Conan J M, Rousset M, Mugnier L M, Michau V 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 2527
- [11] Yang H F, Jiang Z F 2005 *Laser Technol.* **29** 484 (in Chinese) [杨高峰, 姜宗福 2005 激光技术 **29** 484]
- [12] Duan H F, Li E D, Wang H Y, Yang Z P, Zhang Y D 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 1143 (in Chinese) [段海峰, 李恩得, 王海英, 杨泽平, 张雨东 2003 光学学报 **23** 1143]
- [13] Roddier N 1990 *Opt. Eng.* **29** 1174
- [14] Zhang L Q, Rao C H 2012 *Proc. SPIE* **8415** 84150W

Analysis of modal tomography for three-dimensional wavefront sensing of atmosphere turbulence*

Zhang Lan-Qiang¹⁾²⁾³⁾ Gu Nai-Ting¹⁾²⁾ Rao Chang-Hui^{1)2)†}

1) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

2) (*Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 27 February 2013; revised manuscript received 27 April 2013)

Abstract

Three-dimensional (3D) wavefront sensing of atmosphere turbulence is a key step to realize multi-conjugate adaptive optics technology. In this article, model tomography, which is one of the most important algorithms for 3D wavefront sensing, is analyzed in theory, the principle limitation of model tomography is proposed. Based on this view the reason for tomography error is discussed, and the simulation results for different errors are produced finally. The analysis shows that part Zernike model basis is used as a new basis of polynomial decomposition in model tomography, which leads to modal coupling error and aliasing error. The un-correlation of part Zernike model basis is the prerequisite to avoid modal aliasing error, but modal coupling error cannot be removed and we can only restrain its influence. Combined with simulation result a method with large field of view (FOV) sensing and small FOV reconstruction is proposed and gives a good performance to control modal coupling error.

Keywords: 3D wavefront sensing, atmosphere tomography, modal method, error analysis

PACS: 95.75.Qr, 42.68.Wt, 42.30.-d, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.62.169501

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11178004).

† Corresponding author. E-mail: chrao@ioe.ac.cn