

基于AR模型搜索迭代算法的望远镜跟踪误差分析*

廖宏宇¹⁾²⁾³⁾ 马晓燮¹⁾²⁾ 郭友明¹⁾²⁾³⁾ 饶长辉^{1)2)†} 魏凯¹⁾²⁾

1)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610029)

2)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610029)

3)(中国科学院大学, 北京 100039)

(2014年4月5日收到; 2014年5月13日收到修改稿)

在大口径光学望远镜观测星体目标时, 其跟踪误差主要由风载引起的望远镜跟踪抖动误差和大气湍流引起的跟踪误差组成. 建立了望远镜跟踪误差的简化分析模型, 提出了一种采用AR模型迭代算法将风载引起的望远镜跟踪抖动误差和大气湍流引起的跟踪误差分离的新方法, 并在1.8 m望远镜上进行了实验验证. 结果表明, 风载引起的望远镜跟踪抖动误差与风向和风速直接相关, 实验结果与理论分析比较符合.

关键词: 风载, AR模型, 望远镜, 跟踪误差

PACS: 95.55.Cs, 06.20.Dk, 92.60.Gn, 07.05.Kf

DOI: 10.7498/aps.63.179501

1 引言

由于卡塞格林系统可以有效的减小望远镜本身的像差^[1], 因此广泛应用于现有的大口径天文望远镜中. 卡塞格林系统采用了主镜和次镜相结合的方式, 在施加风载条件下, 望远镜的桁架系统会产生结构振动^[2], 从而引入波前整体倾斜误差, 波前倾斜误差会严重影响望远镜成像的像质, 通常采用倾斜跟踪系统校正. 为了达到最佳校正效果, 在设计倾斜跟踪系统时, 需要综合考虑大气湍流引起的波前整体倾斜误差和风载引起的望远镜跟踪误差.

目前, 多用Kolmogorov模型来表示大气湍流引起的波前整体倾斜误差, 而研究风载引起倾斜误差的理论主要集中在: 利用ANSYS软件仿真风载施加条件下特定望远镜的结构振动^[2]; 实验测试风载引起望远镜振动以及抑制方案, 包括但不限于: 采用物理风挡抑制风载扰动^[3]及优化望远镜伺服控制系统参数来抑制风载扰动^[4]; 基于卡尔曼滤波

器的自适应光学校正控制算法^[5,6]; 基于状态空间控制算法的自适应光学校正控制算法^[7-9]; 缺少风载引起望远镜跟踪误差的理论模型及功率谱分布研究.

本文首先理论分析了望远镜的风载振动模型, 然后首次根据二阶AR振动模型理论提出了适用于分析风载引起望远镜跟踪误差的AR模型搜索迭代算法. 利用AR模型搜索迭代算法拟合大气湍流功率谱, 得到风载引起望远镜跟踪误差的功率谱, 并结合具体实验验证分析结果.

2 望远镜跟踪误差分析

在不考虑装配误差情况下, 望远镜跟踪传感器输出信号为^[7]

$$y_n = D\phi_{n-1} + \omega_n, \quad (1)$$

其中, D 为转换矩阵, ϕ_{n-1} 为时间段内的扰动波前信号, ω_n 为该时间段内传感器噪声信号, 一般被认

* 国家自然科学基金(批准号: 11178004)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chrao@ioe.ac.cn

定为均值为0的白噪声信号。

扰动波前信号可分为如下几个构成部分：

$$\phi_n = \phi_n^{\text{tur}} + \phi_n^{\text{vib},1} + \phi_n^{\text{vib},2} + \dots \quad (2)$$

其中, ϕ_n^{tur} 为大气湍流扰动波前信号, $\phi_n^{\text{vib},1}, \phi_n^{\text{vib},2}$ 等等为若干个振动扰动波前信号. 可以看出扰动信号有两大来源: 大气湍流扰动 ϕ_n^{tur} 和振动扰动 ϕ_n^{vib} .

2.1 振动扰动分析

振动扰动常见的振动源有电机驱动跟踪转动振动, 施加风载荷振动, 地震振动等 [2,3]. 而环境风载荷施加为主要振动源. 图 1 为典型的水平式望远镜 [2,3]. 由于桁架系统刚性最小, 桁架变形位移引起次镜的抖动时风载引起望远镜跟踪误差的主要来源. 图 2 为望远镜抖动有限元分析示意图 [2,3]. 当次镜与主镜发生相对位移时, 特别是相对位移中包含次镜绕主光轴作摆动这种状态时, 次镜曲率中心偏离主光轴, 引起望远镜的跟踪误差, 误差(波前整体倾斜角)表达式为 [10,11]

$$\begin{aligned} \vartheta &= \arctan\left(\frac{(1-m)\Delta y_{cc}}{L}\right) \\ &\approx \frac{(1-m)\Delta y_{cc}}{L}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, Δy_{cc} 为次镜曲率中心偏离主光轴量; m 为次镜放大率; L 为次镜到倾斜镜距离.

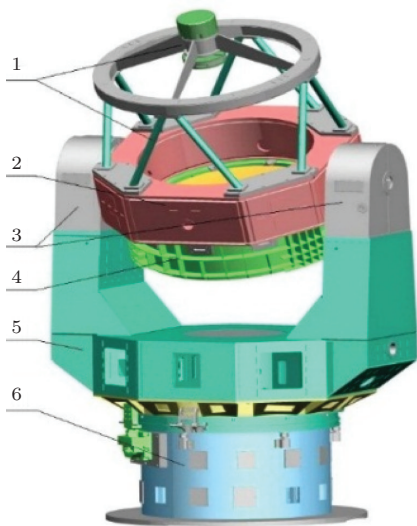


图1 水平式望远镜结构图 1为次镜桁架; 2为主镜筒; 3为立柱; 4为主镜; 5为水平轴; 6为基座

选取俯仰角 45° 条件下讨论次镜在风载荷影响下的振动. 此时望远镜筒简化模型(简化为4根桁架)如图 3(a)所示.

图 3(b) 为次镜力平衡分解. 将桁架次镜系统等效为一根细长梁(长度大于高度5倍以上) [12], 两根旁桁架对次镜等效质心力分解为平行等效梁方向的 (T'_1, T'_2) 和垂直等效梁方向的 (T_1, T_2) , 等效质心所受重力也可分解为 mg_1, mg_2 , 平行和垂直于等效梁的力都可约合为等效梁的刚度和模量贡献因素.



图2 风载引起望远镜抖动的有限元分析结果

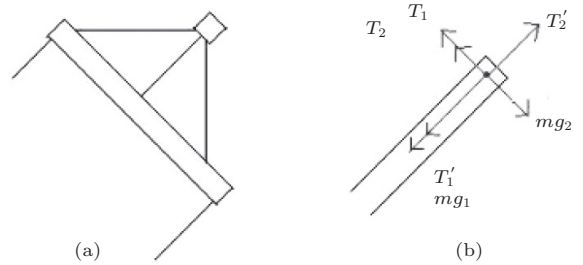


图3 桁架简化及力平衡分解示意图

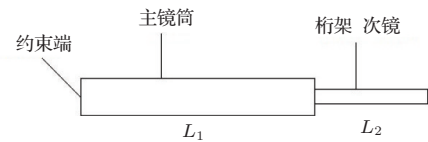


图4 等效梁示意图

当桁架次镜系统等效为一根细长梁时, 主镜筒和次镜桁架系统可以等效为如图 4 所示的粗细不等的圆柱体, 最后约合为一根细长梁.

针对等效细长梁, 一端约束, 一端自由情况下的自由振动模型为(对于几何对称的桁架系统, 都

可以采用等效模型分析)^[12]

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

其中, E 为弹性模量; I 为截面中心轴的惯性积; y 梁质心偏离中心轴距离; x 为质心距离约束端距离; t 时间.

假设梁主振动为无数正弦振动叠加, 细长梁一端固定, 一端施加恒定风载振动方程为^[12]

$$\sum_{i=1}^{\infty} (q_i EI \varphi(l)_i'''' + \ddot{q}_i \rho S \varphi(l)_i) = f, \quad (5)$$

其中, ρ 为单位体积梁的质量; S 为梁横截积; q 为每一个模态中的正弦运动方程; $\varphi(x)_i$ 为正弦运动系数. 式中 $EI \varphi(l)_i''''$ 和 $\rho S \varphi(l)_i$ 都为常数.

(5) 式是一个理论上无数个二阶状态方程迭加的振动状态, 理论上存在着无数个模态频率, 即共振频率.

针对动态风载, 用离散化瞬时风载等效, 在每一个静力脉冲分量时间内, 可以视作等效为细长梁的刚性和模量保持不变, 强迫振动方程变为

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} (q_i EI \varphi(l)_i'''' + \ddot{q}_i \rho S \varphi(x)_i) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} f_i \delta(t - t_i). \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式是一个更为复杂的无数个二阶方程迭加状态方程, 且是时变过程, 理论上也存在无数个由方程右边脉冲分量决定的共振频率.

在实际观测过程中, 由于望远镜主镜筒及桁架系统的刚性非常大, 次镜表现出的绕主光轴摆动十分微小, 次镜共振表现出的模态频率较少. 同时桁架系统极大的刚性和单根桁架的模量抑制了次镜低频 (频率低于 15 Hz) 振动.

这两方面都表明次镜振动产生波前倾斜扰动影响, 主要发生在共振频率段, 在频域内表现为二阶窄带扰动 (作用频段为 15—150 Hz)^[13-15]. 根据二阶传递过程差分方程, 下一状态的倾斜信号总是与上两状态的倾斜信号相关. 次镜振动扰动引起的波前相位整体倾斜信号可以表示为

$$\phi_{n+1}^{\text{vib},i} = a_1^{\text{vib},i} \phi_n^{\text{vib},i} + a_2^{\text{vib},i} \phi_{n-1}^{\text{vib},i} + \mu_{n+1}^{\text{vib},i}, \quad (7)$$

式中, $a_1^{\text{vib},i}$, $a_2^{\text{vib},i}$ 为上两状态振动波前倾斜系数, $\phi_n^{\text{vib},i}$, $\phi_{n-1}^{\text{vib},i}$ 为上两状态振动波前倾斜, $\mu_{n+1}^{\text{vib},i}$ 为这一状态噪声.

2.2 大气湍流扰动特性

光束在大气中传播受到湍流效应的影响, 波前发生畸变, 原因是传播介质折射率由于空气流动 (风) 和空气密度不均匀而发生了变化, 呈现出时间上和空间上的相关性^[16].

大气相干长度 r_0 表征了湍流效应在空间上的相干性^[16], 在某个空间尺度内的空间里湍流扰动相关. 而大气湍流相干时间 τ_0 表征了湍流效应在时间上的相关性^[16], 在某个时间尺度内下一状态的湍流扰动与上一状态的湍流扰动相关. 所以可以将湍流扰动下的波前整体倾斜表示为

$$\begin{aligned} \phi_{n+1}^{\text{tur}} &= a_1^{\text{tur}} \phi_n^{\text{tur}} + a_2^{\text{tur}} \phi_{n-1}^{\text{tur}} \\ &+ a_3^{\text{tur}} \phi_{n-2}^{\text{tur}} + \dots + \mu_{n+1}^{\text{tur}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中, a_i^{tur} 为各个状态系数, μ_{n+1}^{tur} 为这一状态噪声. 各个系数 a_i^{tur} 表明了湍流扰动时间域上的物理联系. 对于实际物理状态, a_i^{tur} 个数不确定, 且为时变.

但是如果在极小的采样时间内, 可以将 a_i^{tur} 视为恒定值, 则波前倾斜表示为一个确定的湍流扰动状态.

基于在长时间跨度内湍流作用的时间相关性很弱, 作者将 a_i^{tur} 设定为 a_1^{tur} , a_2^{tur} , 则波前倾斜信号为

$$\phi_{n+1}^{\text{tur}} = a_1^{\text{tur}} \phi_n^{\text{tur}} + a_2^{\text{tur}} \phi_{n-1}^{\text{tur}} + \mu_{n+1}^{\text{tur}}. \quad (9)$$

3 湍流扰动与振动扰动功率谱分离

由第二节分析可得知, 当望远镜上只存在风载荷振动源时, 波前倾斜传感器输出信号可表示为

$$\gamma_n = \phi_n^{\text{tur}} + \phi_n^{\text{vib}} + \omega_n, \quad (10)$$

式中, γ_n 为波前总体倾斜信号; ϕ_n^{tur} 为湍流扰动波前倾斜信号; ϕ_n^{vib} 为振动扰动波前倾斜信号; ω_n 为噪声信号.

波前倾斜传感器输出信号中湍流扰动信号和振动扰动信号及噪声信号混杂在一起^[17]. 它们的成因: 湍流扰动是高空大气中的湍流效应影响光束传播造成波前畸变; 振动扰动是近地面施加风载荷到望远镜导致望远镜次镜振动引起的光束接收系统相对位移形成波前畸变. 而高空大气和近地面风载荷是互相独立的两个过程, 决定了这两个扰动信号是互相独立的.

由此,波前倾斜传感器输出信号功率谱可以表示为

$$S^\gamma = S^{\text{tur}} + S^{\text{vib}} + S^\omega, \quad (11)$$

式中, S^γ 为波前总体倾斜功率谱; S^{tur} 为湍流扰动波前倾斜功率谱; S^{vib} 为振动扰动波前倾斜功率谱; S^ω 为噪声功率谱.

波前倾斜传感器输出波前信号功率谱是两个扰动信号功率谱线性相加得到. 对于功率谱密度曲线来说, 有 [18,19]

$$P^\gamma = P^{\text{tur}} + P^{\text{vib}} + P^\omega = \int S^{\text{tur}} df + \int S^{\text{vib}} df + \int S^\omega df, \quad (12)$$

式中, P^γ 为波前总体倾斜信号功率; P^{tur} 为湍流扰动波前倾斜信号功率; P^{vib} 为振动扰动波前倾斜信号功率; P^ω 为噪声功率.

在频域内可以利用湍流扰动和振动扰动的独立性, 作用频段的分隔性及功率谱表现差异性, 将两者的功率谱进行分离. 根据分离出的功率谱密度曲线, 积分求得各自功率, 进而可以衡量和分析湍流扰动和振动扰动对波前信号整体倾斜的影响.

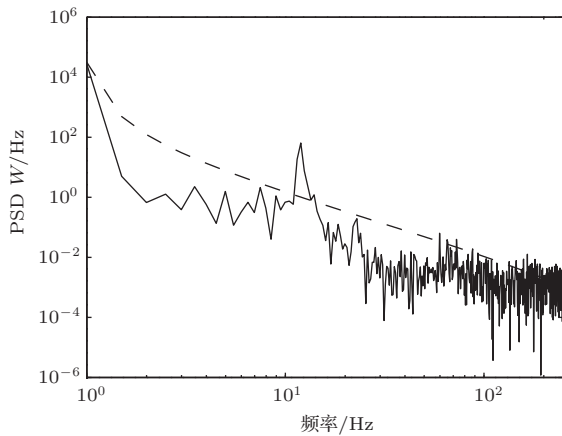


图5 波前斜率信号及初始湍流扰动信号估计谱

用经典功率谱估计算法估计功率谱表示传感器输出信号功率谱的测量值, 用基于二阶 AR 模型的 Burg 算法 [20-22] 估计湍流扰动信号功率谱. 如图 5 所示: 实线为波前斜率功率谱, 点线为湍流估计谱. 在波前功率谱中, 振动扰动显示为一个窄带的波峰, 在这个窄带范围内贡献绝大部分功率. 而湍流扰动则为宽频功率谱.

波前斜率信号误差总体功率分解为

$$\sigma_\gamma^2 = \sigma_{\text{tur}}^2 + \sigma_{\text{vib}}^2, \quad (13)$$

式中, σ_γ^2 为总体误差功率; σ_{tur}^2 为湍流扰动误差功率; σ_{vib}^2 为振动扰动误差功率.

由于振动扰动功率 σ_{vib}^2 的存在, 估计出的湍流扰动信号功率谱会整体向上抬, 与真实湍流信号功率谱相差较大. 如果在估计的过程中, 能够不断减小 σ_{vib}^2 , 估计谱就会不断趋近真实湍流扰动信号功率谱.

根据上述分析, 提出一种基于 AR 模型的搜索迭代算法来分离湍流扰动信号功率谱和振动扰动信号功率谱. 算法的目的是估计出最接近真实值的湍流扰动信号功率谱, 然后将传感器输出信号的功率谱与湍流扰动信号功率谱估计值进行差分, 得到振动扰动信号功率谱的估计值, 进而分析风载引起望远镜跟踪误差的影响. 算法的流程如图 6 所示.

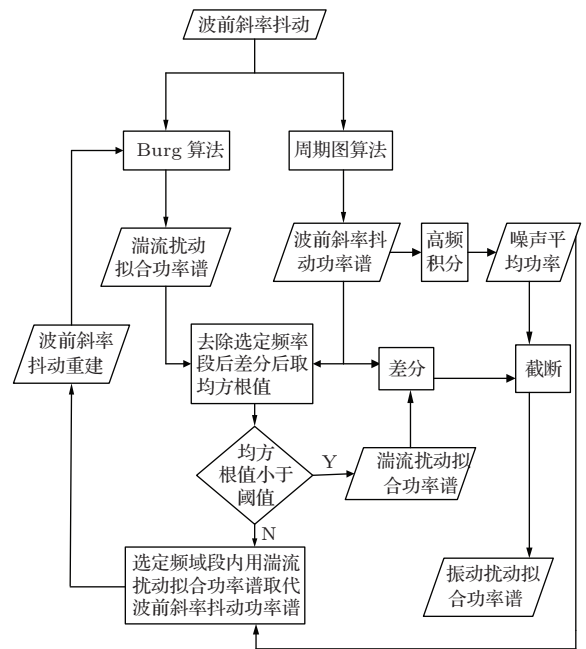


图6 AR模型搜索迭代算法流程图

基于 AR 模型的搜索迭代算法流程图解释:

- 1) 设置振动扰动信号作用频段 $[f_1, f_2]$;
- 2) 利用经典周期图功率谱估计算法估计出传感器输出信号功率谱 \hat{S}^γ , 作为一个参照的真实值;
- 3) 利用现代 AR 模型功率谱估计中的 Burg 算法第一次估计出传感器输出信号功率谱 \hat{S}'^γ , 作为湍流扰动信号功率谱的第一次拟合估计值, 利用积分法求出噪声平均功率密度值 S_σ ;
- 4) 在 $[f_1, f_2]$ 频段内, 搜索 S^γ 与 \hat{S}'^γ , 将 \hat{S}'^γ 中小于 $S^\gamma - S_\sigma$ 的值标记为目标功率密度 $\langle \hat{S}'^\gamma \rangle$, 将 S^γ 中对应频率处的傅里叶变化值 $\Gamma(f)$ 替换为 $\langle \hat{S}'^\gamma \rangle$

处的傅里叶变换值 $\langle \Gamma(f) \rangle$, 得到替换后的傅里叶变换值 $\Gamma(f)$, 对 $\Gamma(f)$ 进行傅里叶逆变换, 取实, 重构出传感器输出信号 γ_1 ;

5) 利用现代 AR 模型功率谱估计中的 Burg 算法估计出 γ_1 的功率谱 \widehat{S}^{γ_1} , 将 \widehat{S}^{γ_1} , $\widehat{S}^{\gamma'}$ 与 \widehat{S}^{γ} 带入判定条件进行判定, 判定条件: 在 $(0, f_1]$ 频段内, \widehat{S}^{γ_1} 与 \widehat{S}^{γ} 差分绝对值的平均值是否小于 0.5 倍 $\widehat{S}^{\gamma'}$ 与 \widehat{S}^{γ} 差分绝对值的平均值. 若判定为真, 则停止迭代, \widehat{S}^{γ_1} 为最终值, 即为湍流扰动信号功率谱估计值;

6) 若判定为假, 则用 \widehat{S}^{γ_1} 替换 $\widehat{S}^{\gamma'}$, 重复步骤 4), 5), 直到判定条件为真;

7) 将 \widehat{S}^{γ} 与最终湍流扰动信号估计功率谱 \widehat{S}^{γ_1} 进行差分, 得到振动扰动信号估计功率谱 \widehat{S}^{tur} , 在 \widehat{S}^{tur} 中, 对于负数部分用 S_0 代替, 得到最终振动扰动信号估计功率谱 \widehat{S}^{tur} .

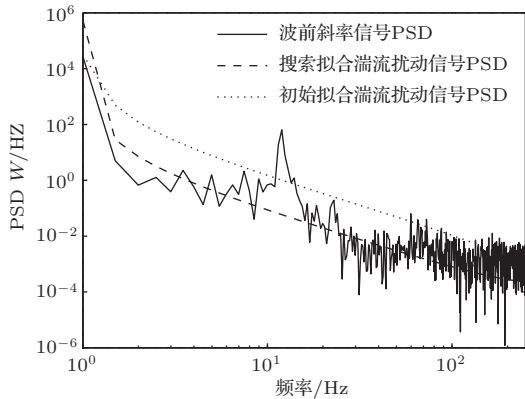


图7 波前斜率信号及改进算法后湍流扰动信号估计谱

搜索迭代算法需要注意以下两点:

1) 风载引起望远镜跟踪误差的频段

如何在功率谱上寻找风载引起望远镜跟踪误差的作用频段目前还没有定论, 常用的方法是根据大量观察数据得到一个经验值 [13-15], 作为振动扰动作用频段, 也有根据 CCD 镜头采样频率来划分湍流扰动和振动扰动作用频段 [7]. 作者目前根据波前斜率信号功率谱最高波峰结合最后分析结果人为确定最佳风载引起望远镜跟踪误差的频段.

2) 振动扰动倾斜信号功率密度曲线非负处理

由于拟合误差的存在, 计算得到的风载引起望远镜跟踪误差功率谱密度存在负数. 因此在数据处理中将噪功率均值作为最小值 (噪声在全频段都存在).

如图 7 为应用基于 AR 模型的搜索迭代算法于

同一组数据后的结果. 从图中明显可以看出, 相比较于初始时采用 Burg 算法估计出来的湍流功率谱, 搜索迭代算法估计出来的湍流功率谱非常接近测量值, 在振动扰动作用频段, 湍流估计谱与真实值拟合得非常好.

4 实验结果分析

如图 8 所示, 我们在 1.8 m 口径望远镜平台上, 采用跟踪系统中波前倾斜传感器探测恒星波前到达望远镜的整体倾斜抖动; 采用由 Gill 公司制造的超声波风速仪 (型号为: 1590-PK-020) 采集望远镜处的风载 (风速和风向). 1.8 m 望远镜跟踪系统中的波前倾斜传感器由成像透镜和 CCD 相机构成, 采样帧频为 100—500 Hz 可调 [23,24].

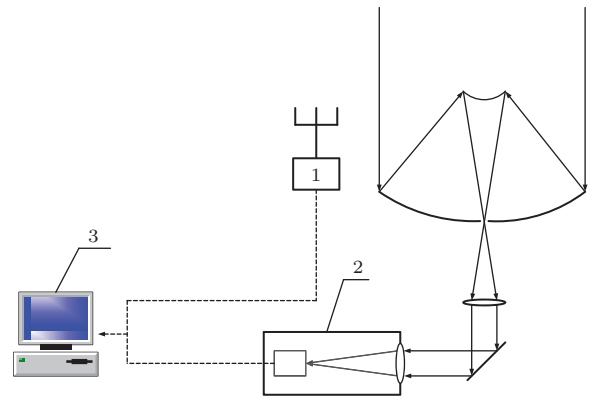


图8 实验布局示意图 1 为风速仪; 2 为波前倾斜传感器; 3 为数据采集系统

根据实际的环境风载和设计的观测模型, 选取不同的恒星进行风载实验. 在观测对象为恒星的情况下, 望远镜振动源主要为风载. 采用基于 AR 模型的搜索迭代算法处理观测数据, 从而分离湍流扰动信号功率谱和振动扰动信号功率谱, 得到风载引起望远镜跟踪误差.

实验中采用三种风载模型:

1) 风载与望远镜水平角反向: 此时望远镜俯面 (X 轴) 承受风压较大, 理论上 X 轴波前斜率较 Y 轴倾斜受风载影响更大, 抖动更强烈;

2) 风载与望远镜水平角正交: 此时望远镜侧面 (Y 轴) 承受风压较大. 按照前述分析, 桁架系统是风载主要作用点, 虽然主镜筒有立柱支撑刚性较大, 但是理论上 Y 轴波前斜率较 X 轴倾斜受风载影响更大, 抖动更强烈;

3) 随机风载: 是望远镜一般观测模式. 此时望

远镜俯仰面和侧面都要承受风压,孰大孰小要取决于风载与水平角相交角度.理论上承受风压较大一面波前斜率受风载影响更大,抖动更强烈.

三组实验中,环境风载测量结果如表 1 所示.

三组实验中, X, Y 轴波前斜率观测信号及估

计功率谱如图 9 至图 11 所示.

三组实验结果分析如表 2.

由图 9 至图 11, 以及表 1 和表 2 可得:

望远镜 X 轴和 Y 轴振动扰动共振频率约为 13 Hz, 符合我们的理论分析.

表 1 望远镜指向与风载参数表

	望远镜指向			环境风载	
	水平角/(°)	俯仰角/(°)	风向均值/(°)	水平风速均值/(m/s)	垂直风速均值/(m/s)
第一组实验	356.3	70.9	187.05	2.1645	0.0875
第二组实验	95.3	67.77	177.7	3.3685	0.0445
第三组实验	323.2	64.8	170.75	1.565	0.191

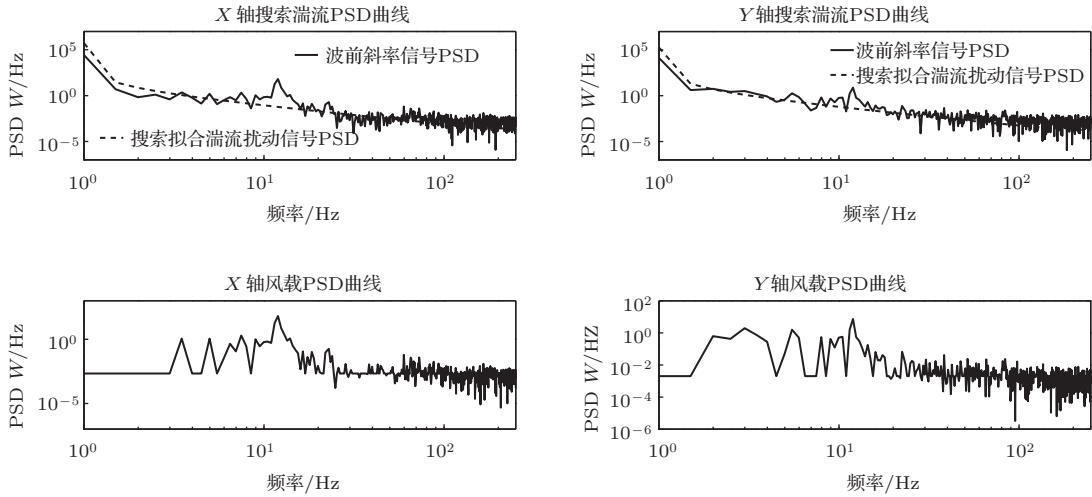


图 9 第一组实验 X 轴和 Y 轴测量结果

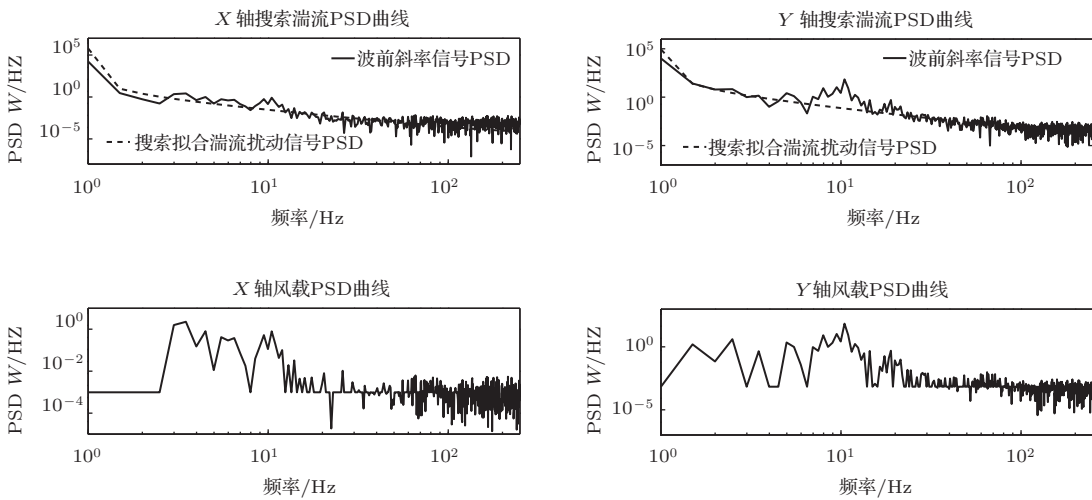


图 10 第二组实验 X 轴和 Y 轴测量结果

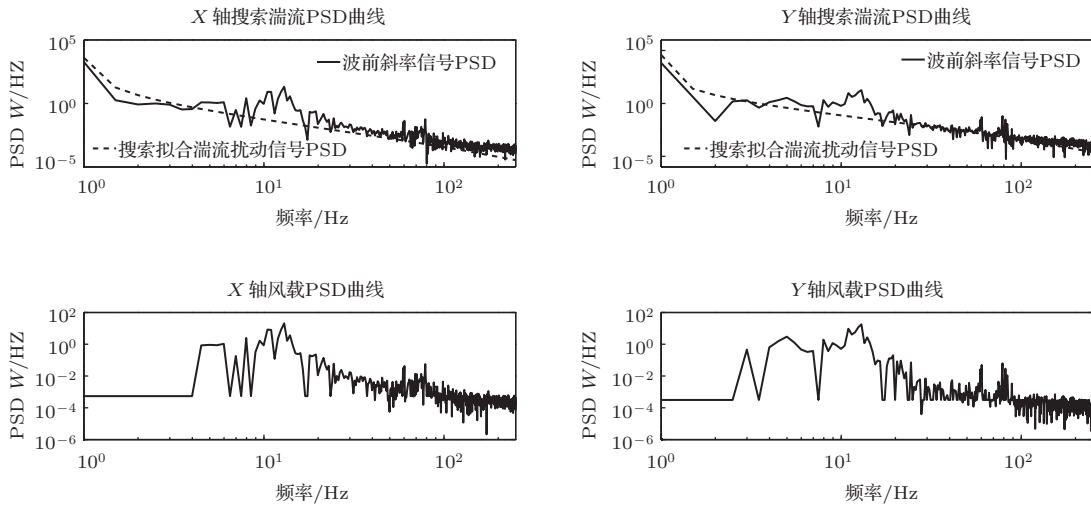


图 11 第三组实验 X 轴和 Y 轴测量结果

表 2 实验分析结果

		波前倾斜 均值 / (")	波前倾斜 抖动 RMS 值 / (")	湍流扰动引起的 波前倾斜误差 / (")	风载引起望远镜 跟踪误差 / (")
第一组实验	X 轴	5.21	0.48	0.11	0.47
	Y 轴	3.61	0.27	0.13	0.23
第二组实验	X 轴	4.15	0.17	0.08	0.15
	Y 轴	3.17	0.56	0.20	0.51
第三组实验	X 轴	1.35	0.38	0.09	0.37
	Y 轴	2.59	0.40	0.11	0.39

第一组实验中: 在湍流扰动引起的波前倾斜误差近似相等的情况下, X 轴振动扰动功率要显著大于 Y 轴. 同时 X 轴波前斜率信号 RMS 值也显著大于 Y 轴波前斜率信号. 显示 X 轴受到的风载影响要强于 Y 轴受到的风载影响, 符合理论分析.

第二组实验中: Y 轴湍流扰动引起的波前倾斜误差虽然远远大于 X 轴湍流扰动引起的波前倾斜误差, 但是此时 Y 轴风载引起的望远镜跟踪误差大于 X 轴. 同时 Y 轴波前斜率信号 RMS 值也显著大于 X 轴波前斜率信号 RMS 值, 显示 Y 轴受到风载扰动影响要强于 X 轴受到风载扰动影响, 符合前述分析. 将第二组分析结果与第一组分析结果比较, 在风载平均速度更大情况下, 第二组 Y 轴波前斜率 RMS 值和风载引起的望远镜跟踪误差也大于第一组 X 轴.

第三组实验中: X 轴和 Y 轴湍流扰动引起的波前倾斜误差相差不大, 而 Y 轴风载引起的望远镜跟踪误差大于 X 轴风载引起的望远镜跟踪误差,

Y 轴波前斜率 RMS 值大于 X 轴波前斜率 RMS 值. X 轴和 Y 轴之间这种不算显著的差异符合前述风载对于两者影响分析: 风载同时影响 X 轴和 Y 轴, 但是 Y 轴受风压更大, 风载引起的望远镜跟踪误差更大.

5 结 论

本文首先分析论证了风载引起望远镜次镜抖动符合二阶振动模式, 根据次镜振动扰动特性和湍流扰动特性引入基于 AR 模型的现代功率谱估计算法, 发现由于振动扰动功率的存在, 谱估计算法不能很好的估计出湍流功率谱. 在分析湍流扰动和振动扰动独立不相关和功率分布间隔的特点后, 基于 AR 模型谱密度估计算法, 提出了一种搜索迭代算法, 很好的估计出湍流功率谱, 进而得到振动扰动功率谱, 并通过具体实验验证了风载与振动扰动影响的紧密联系, 及搜索迭代算法的有效性.

对于此搜索迭代算法的进一步改进集中于扰动作用频段的通用性精确性识别, 作者的一个初步想法是根据传感器输出信号功率谱曲线切线斜率变化规律精确辨识出振动波峰, 留待下一步研究.

感谢中国科学院光电技术研究所总体研究室陈克乐同学对实验的大力协助.

参考文献

- [1] Bian Y L 2008 *Physics* **37** 844 (in Chinese) [卞毓麟 2008 物理 **37** 844]
- [2] Zhou C 2011 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [周超 2011 博士学位论文 (中科院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [3] Li Z, Song T F, Xu J 2012 *Astronomical Research and Technology* **9** 1189 (in Chinese) [李志, 宋腾飞, 许俊 2012 天文研究与技术 **9** 1189]
- [4] Liu G Q, Cheng X M, Song T F, Zhao X J 2011 *Opto-Electronic Engineering* **38** 50 (in Chinese) [柳光乾, 程向明, 宋腾飞, 赵雪娟 2011 光电工程 **38** 50]
- [5] Lisa A Poyneer, Jean-Pierre Veran 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** A223
- [6] Caroline Kulcsar, Paolo Massinot, Gaetano Sivo, Henri-Francois Raynaud 2012 *Proc. of SPIE* **8447** 84470Z
- [7] Serge Meimon, Cyril Petit, Thierry Fusco, Caroline Kulcsar 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** A122
- [8] Andres Guesalaga, Benoit Neichel, Francois Rigaut, James Osborn, Dani Guzman 2012 *Applied Optics* **51** 4520
- [9] Carlos Correia, Jean-Pierre Veran, Glen Herriot 2012 *J. Opt. Soc. Am. A* **29** 185
- [10] Shack R V, Thompson K 1980 *SPIE* **251** 149
- [11] Porro I L, Traub W A, Carleton N P 1999 *Applied Optics* **38** 6055
- [12] Liu Y Z, Chen W L, Chen L Q 1998 *Mechanic of Vibrations* (Beijing: HIGHER EDUCATION PRESS) p130 (in Chinese) [刘延柱, 陈文良, 陈立群 1998 振动力学 (北京: 高等教育出版社) 第 130 页]
- [13] Caroline Kulcsar, Gaetano Sivo, Henri Francois Raynaud, Benoit Neichel, Francois Rigaut, Julian Christou, Andres Guesalaga, Carlos Correia, Jean-Pierre Veran, Eric Gendron, Fabric Vidal, Gerard Rousset, Tim Morris, Simone Esposito, Fernando Quiros-Pacheco, Guido Agapito, Enrico Fedrigo, Lorenzo Pettazzi, Richard Clare, Riccardo Muradore, Olivier Guyon, Fantz Martynache, Serge Meimon, Jean-Marc Conan 2012 *Proc. of SPIE* **8447** 84471C
- [14] Douglas G. Macmynowski, Torben Andersen 2010 *Applied Optics* **49** 625
- [15] Douglas G. Macmynowski, Konstantinos Vogiatzis, George Z. Angeli, Joeleff Fitzsimmons, Jerry E. Nelson 2006 *Applied Optics* **45** 7912
- [16] Rao C H 2000 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: The Institute of Optics and Electronics of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [饶长辉 2000 博士学位论文 (中国科学院光电技术研究所)]
- [17] Rao C H, Jiang W H 1996 *Acta Astrophysica Sinica* **16** 428 (in Chinese) [饶长辉, 姜文汉 1996 天体物理学报 **16** 428]
- [18] Rao C H, Shen F, Jiang W H 2000 *Acta Photonica Sinica* **20** 68 (in Chinese) [饶长辉, 沈锋, 姜文汉 2000 光学学报 **20** 68]
- [19] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134207 (in Chinese) [郭友明, 马晓燊, 饶长辉 2013 物理学报 **62** 134207]
- [20] Wang Z Q, Zhong M C, Zhou J H, Li Y M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 188701
- [21] Ou Y Y H, Yuan P, Jia X D, Wang X Y, Xue S M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084303 (in Chinese) [欧阳玉花, 袁萍, 贾向东, 王小云, 薛思敏 2013 物理学报 **62** 084303]
- [22] Chen W, Yao H M, Wu F, Fan B, Wu S B, Chen Q 2005 *Acta Photonica Sinica* **35** 130 (in Chinese) [陈伟, 姚汉民, 伍凡, 范斌, 吴时彬, 陈强 2005 光子学报 **35** 130]
- [23] Rao C H, Jiang W H, Zhang Y D, Ling L, Zhang X J, Xian H, Wei K, Liao Z, Zhou L C, Guan C L, Li M, Chen D H, Zhang A 2008 *Proc. of SPIE* **7015** 70155Y-1
- [24] Rao C H, Wei K, Zhang X J, Zhang A, Zhang Y D, Xian H, Zhou L C, Guan C L, Li M, Chen D H, Chen S Q, Tian Y, Liao Z 2010 *Proc. of SPIE* **7654** 76541H-1

Analysis of tracking error of telescope based on AR-search-iteration algorithm*

Liao Hong-Yu¹⁾²⁾³⁾ Ma Xiao-Yu¹⁾²⁾ Guo You-Ming¹⁾²⁾³⁾ Rao Chang-Hui^{1)2)†} Wei Kai¹⁾²⁾

1) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610029, China*)

2) (*Key Lab of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610029, China*)

3) (*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(Received 5 April 2014; revised manuscript received 13 May 2014)

Abstract

The tracking errors of large-caliber optical telescope in the process of observing astral target consists of telescope tracking jitter error which is mainly caused by wind-load, and wave-front tilt error caused by atmospheric turbulence. A simplified model concerning telescope tracking error is established, and a new kind of algorithm based on AR model to separate the telescope tracking jitter error from the tracking error caused by atmospheric turbulence is proposed. Finally, an experiment is conducted on the platform of the 1.8 M telescope in Gaomeigu Observing Station to test this algorithm. Experimental results show that the telescope tracking jitter error caused by wind-load is directly related to the direction and speed of the wind, which conforms to the theoretical analysis.

Keywords: wind-load, AR model, telescope, tracking error

PACS: 95.55.Cs, 06.20.Dk, 92.60.Gn, 07.05.Kf

DOI: [10.7498/aps.63.179501](https://doi.org/10.7498/aps.63.179501)

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

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