

现代天文选址中的视宁度

仇朴章 刘忠

(中国科学院云南天文台, 昆明 650011)

提 要

意在实现高分辨率成像的新型天文望远镜对天文视宁度提出的更高的要求。本文从湍流介质中的成像理论出发, 论述了视宁度的现代定义、湍流的层状结构和选址策略; 简要介绍了现代天文选址中视宁度的测量。

一、引 言

在过去很长的时期内, 天文视宁度主要是选址决策过程中的一个重要参量。台址选定后, 它就不再是一个积极的参量, 而被当做一个既成事实来接受。

70年代以后, 由于以湍流介质中的成像理论为基础的天文高分辨率成像方法和技术的出现, 导致视宁度概念和测量方法的变革。已投入运转和正在研制或计划中的新一代天文望远镜几乎都以实现衍射受限分辨率成像为宗旨, 这就对视宁度提出了更高的要求。例如自适应光学望远镜的四个重要参数: 空间分辨率 r_o -Fried 参数、时间分辨率 $\tau = r_o/v$ 、调整元数目 $N = \left(\frac{D}{r_o}\right)^2$ 、等晕区 $\theta = r_o/\bar{h}$ (D 为望远镜口径, v 为平均风速, \bar{h} 为湍流层平均高度); 光学干涉中条纹的最大积分时间 $\tau = r_o/v$; 斑点像复原的样本积分时间 $\tau = r_o/\Delta v$ (Δv 为风速的扩散) 以及像的信噪比等许多重要指标和参数均以视宁度 (r_o) 为主要参量^[1,2]。视宁度已不仅在选址决策中, 而且在台址选定后的仪器设置和观测实施中都是一个积极的参量。描述大气光学品质的视宁度已成为现代天文选址中最重要指标。

二、天文视宁度的现代定义

大气湍流是地面天文望远镜像质降低的根源。取空气的流体粘滞系数 $\mu = 15 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 空气流的平均速度 $v = 1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 横向特征尺寸 $L = 15 \text{m}$, 则雷诺数

$$R = vL/\mu = 10^6 \quad (1)$$

对应于充分发育的湍流。可见, 空气几乎总是湍流。

湍流混合引起空气在涡流尺度上的温度不均匀性导致的折射率随机起伏是天文视宁度的起源。折射率起伏引起在大气中传播的光波的光程起伏, 或者说是波前复振幅的随机起伏。

若一垂直光瞳面入射的大气外平面波复振幅为 A , 通过湍流大气到达光瞳面时变为 $A(x, t) e^{j\Phi(x, t)}$, 此处 $A(x, t)$ 和 $\Phi(x, t)$ 分别为波前的振幅和位相, 两者均为光瞳面坐标 x 和时间

t 的随机函数, j 为虚数符号。对于圆形光瞳函数

$$P(x) = \text{Circ}(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ 在瞳内} \\ 0, & x \text{ 在瞳外} \end{cases} \quad (2)$$

复瞳函数

$$\mathcal{P}(x, t) = P(x)A(x, t)e^{j\Phi(x, t)} \quad (3)$$

的夫琅和费衍射的强度分布不再是经典的爱里图样, 可将它分解为三种基本效应:

$$|\mathcal{F}\{\mathcal{P}(x, t)\}|^2 = \left. \begin{array}{l} \text{像重心运动(波前倾斜)} \\ \text{像模糊(位相畸变)} \\ \text{像闪烁(振幅起伏)} \end{array} \right\} \text{天文视宁度}, \quad (4)$$

此处 \mathcal{F} 代表傅里叶变换运算符。经典天文视宁度概念实质上就是上述三种效应的综合, 并定义为长曝光点源星像 $\langle |\mathcal{F}\{\mathcal{P}(x, t)\}|^2 \rangle$ (尖括号代表时间平均运算) 的半幅值宽度 ω_{FWHM} 。像重心运动中含有望远镜跟踪误差和风等因素引起的振动; 像模糊与望远镜口径^[1,2]、像差及调焦误差有关; 像闪烁也与口径有关^[2], 因此很难在长曝光星像的 ω_{FWHM} 中排除非大气因素影响来得到准确的视宁度估计。

良好的视宁度定义应该是描述大气光学性质的本征参量。湍流介质的成像理论中的大气相干直径 r_0 (Fried 参数) 就是这种参量, 它在几乎所有的重要公式中都是一个基本参量^[1,2], 深刻描述了湍流对成像的影响, 已被广泛接受, 并作为天文视宁度的现代定义。Fried 参数的物理含义可从两种观点去理解。第一种是 Fried^[3] 最初引入时的含义, 即能在地面上实现衍射受限成像的望远镜的口径上限。换句话说, 由于大气湍流的影响, 只有口径 $D \leq r_0$ 的天文望远镜才能达到其理论分辨率, 而任何大口径望远镜在长曝光模式下的分辨率实际上仅与 $D = r_0$ 的小口径望远镜相当。第二种理解是随机光场的波前复振幅的统计相关直径, 常称为大气相干直径。可以证明^[2], 望远镜光瞳面上的随机波前的相干面积为

$$S = \lambda^2 \sigma = 0.342 r_0^2 \quad (5)$$

式中 λ 为波长, σ 为无量纲面积。在湍流的统计各向同性的假设下, 由上式可得出相干直径 l_0 为

$$l_0 \approx 0.66 r_0 \quad (6)$$

系数 0.66 是 Fried 参数的最初定义和相干面积定义之间的非本质差异引起的, 因此 r_0 本质上就是波前的相干直径。

湍流引起了温度或折射率的随机起伏。描述随机场起伏强度时常使用结构函数。温度结构函数 D_T 定义为其均方起伏

$$D_T(\rho) = \langle |\theta(\mathbf{r} + \rho) - \theta(\mathbf{r})|^2 \rangle \quad (7)$$

式中 T 代表温度, θ 代表随机温度场, \mathbf{r} 为空间坐标矢量, ρ 为矢量增量。当湍流具有 Kolmogorov 功率谱时^[1,2]

$$D_T(\rho) = C_T^2 \rho^{2/3} \quad (8)$$

上式称为 Obukhov 定律, 式中 C_T^2 称为温度结构常数。

随机折射率场有相似的关系

$$D_N(\rho) = C_N^2 \rho^{2/3} \quad (9)$$

C_N 称为折射率结构常数, 和 C_r 的关系为

$$C_N = AC_r \quad (10)$$

其系数^[2]

$$A = 79 \times 10^{-6} P/T^2 \quad (11)$$

P 为大气压强(毫巴), T 为温度(k)。顺便说明, 结构常数实际上是位置和 高度的函数, 仍称为“常数”是为了与结构函数相区别。

Fried 参数 r_0 与 C_N^2 之间的关系为^[1,2]

$$r_0 = \left[0.423 k^2 \sec Z \int_0^\infty C_N^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (12)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, $\sec Z$ 为天顶距 Z 的正割函数, h 为高度。

公式(7)—(12)是现代视宁度的基本公式。像重心运动, 模糊和闪烁均可用 C_N^2 或 r_0 表达^[2], 这就提供了多种测量宁静度的方法。综合使用这些方法不仅能得到精确的视宁度值, 还能了解不同高度的湍流层对视宁度的贡献, 这些数据是现代天文选址所必需的。

此外, 现代视宁度定义 r_0 和经典视宁度定义 ω_{FWHM} 及望远镜在大气中的实际分辨率 δ 之间存在着简单的关系^[4]

$$\omega_{\text{FWHM}} = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (13)$$

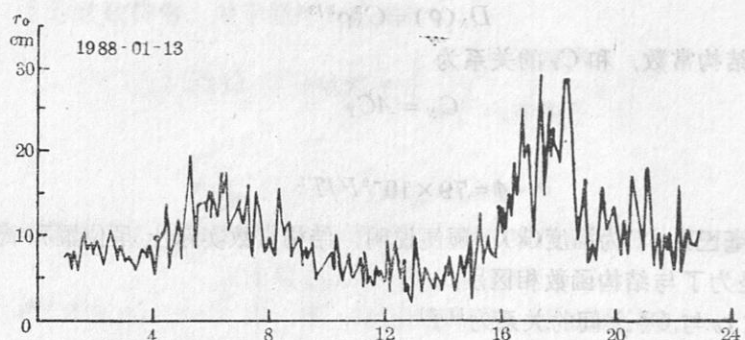
和^[2]

$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{\lambda}{r_0} = 1.27 \frac{\lambda}{r_0} \quad (14)$$

三、湍流分层和选址策略

观测表明, 大气湍流呈现层状分布: 湍流存在于百米量级的薄层中, 各层之间显现出宏观不连续性, 不同高度层的湍流对视宁度有不同的贡献。按高度概略划分湍流层位对天文选址是有意义的。通常把湍流划分为地面层(地面以上数十米)、边界层(地面上 1km, 包含了地面层)和自由大气层(1km 以上)。地面层湍流与地面风速、风向、温度梯度、周围的地形地貌、地面组成(岩石, 土壤, 植被等)以及人类活动(道路, 建筑等)等各种因素密切相关, 呈现显著的局域性。地面层湍流还有明显的周日变化规律, 这是和太阳对地面的周日加热相关的。周日变化也存在于自由大气中。图 1 是一条实测的 r_0 周日变化曲线^[5]。 r_0 的典型行为通常是从太阳初升时的极大值急剧下降到下午初期的极小值, 然后又上升到落日后的次极大, 夜间再轻微增大。白昼宁静度显然逊于夜晚, 表明太阳观测选址更困难。

空气中温度起伏强度 C_T^2 一般是随高度减弱, 但注意到公式(12)中的 r_0 是由高度的积分决定, 所以自由大气湍流因其很长的积分路径而在宁静度贡献中占有很大的比重。此外, 观测证明了自由大气中的湍流集中在典型厚度为 100—200m 的薄层中, C_N^2 在这些薄层中常增大到背景水平以上一个量级。这些薄湍流层是由于不同风速矢量的空气层间的风剪切所触发。

图 1 r_0 周日变化曲线

Mauna Kea 的闪烁观测表明,在地面上 5.6km(海拔 9.8km)的高空存在一个薄的强湍流层,它是季风和西风之间的强风剪切所引起^[6]。表 1 是 La Silla, Mauna kea 和 La Palma 三处宁静度的部分观测资料^[6,7](以 ω_{FWHM}'' 表示),从中可看出自由大气湍流和边界层湍流的贡献相当,因此在选址中应测量各种高度层湍流对视宁度的贡献。

表 1 三个台址视宁度

	La Silla	Mauna Kea	La Palma
自由大气	0".34	0".46	0".40
边界层	0".73	0".28	0".50

因自由大气(特别是高空)湍流具有大范围的一致性,再注意到边界层湍流的局域性特点,就自然得出如下的选址策略:天文选址首先应对大区域的高空湍流进行调查分析,然后在自由大气环境较好的区域内寻找边界层湍流弱的地点。这种“由面到点,从高到低”的策略在欧洲的太阳天文台联合组织—JOSO 选址中得到了充分体现^[8],其选址概念的演变富有启发性。

JOSO 初期是在所谓的“海洋和风”概念(sea breeze concept)指导下开展地中海沿岸选址的,认为来自海面的“和风”能使沿岸台址有较好的视宁度。然而,选址观测中却发现逆海洋和风,即来自海洋的和风被陆地加热后从高空反转方向吹向海洋,正、逆两种和风间的剪切引起的湍流层使自由大气视宁度变坏。这个发现导致了 JOSO 选址从地中海沿岸向大西洋海岛的战略转移,最后选择了加那利群岛上伸出逆温层以上的山峰。加那利群岛的季风系统中有一高度约 1400m 的逆温层,它有效地抑制了山坡下部湍流向上层的对流扰动,使逆温层上的山峰(如 Pico de Teide 3717m, Roque de los Muchachos 2426m, Izaña 2391m)有良好的视宁度。这些山峰常常出现在以云海为特征的逆温层以上,有如海洋中的岛屿,被称为“大气群岛”(atmospheric islands)。JOSO 选址中从“海洋和风”到“大气群岛”概念的演变正说明选址应遵循“由面到点,从高到低”的策略。

四、视宁度的现代测量方法

现代视宁度测量的主要目标是得出 r_0 ,而且不仅要测出总视宁度,还要测量不同高度湍

流层对总视宁度的贡献, 视宁度的周日变化、季节性变化, 各种视宁度出现的频率、等晕区的尺度等。所谓等晕区是指湍流大气中, 线性空不变成像公式成立的区域。下面按照从低到高的顺序扼要叙述现代天文选址中已成为常规的视宁度测量方法。

1. 地面层湍流

常规的测量方法是竖立一座高 30m 的气象铁塔, 在塔的不同高度上放置微温度传感器(如铂温度探测器), 以很高的精度(2×10^{-3} 度)测量温度起伏并实时计算出 C_N^2 的垂直分布。还在塔上按一定高度间隔放置温度计和风速计测量风速, 风向和环境温度。根据公式(10), (11)得到 C_N^2 的垂直分布, 然后由(12)式从地面到塔顶的积分就可计算地面层湍流对视宁度的贡献。

2. 边界层湍流

对于高度 30m—1000m 范围内的湍流, 通常用声探测器 (Acoustic Sounder-SODAR) 测量声波后向散射的声功率来得到 C_N^2 。

3. 自由大气湍流

Roddier^[9]等人通过实测得到的结果

$$\int_0^{3km} C_N^2(h)dh = 4.9 \times 10^{-13} m^{1/3}, \quad \int_{3km}^{\infty} C_N^2(h)dh = 5.5 \times 10^{-13} m^{1/3}$$

和表 1 的数据很一致, 表明自由大气湍流应予以充分重视。测量自由大气湍流的方法有两类: 一类是用光学方法测量恒星的闪烁, 如 Vernin 和 Roddier^[10,11] 提出的恒星像空间-时间功率谱或空间-时间角度相关测量方法。用于闪烁测量的仪器称为 Scidar (Scintillation Detection and Ranging); 另一类是无线电探空, 用球载微温度传感器测量各种高度的温度梯度。

4. 总视宁度

总视宁度是指公式(12)表示的 r_0 , 它是所有湍流层的总贡献, 是天文视宁度的最终指标。精确测量 r_0 及其变化规律是天文选址的一项主要任务。前述几种方法的综合虽然也能得到 r_0 , 但目前最方便、最精确的是光学方法。光学方法是指通过测量湍流对成像的效应来得到 r_0 。在本文第二部分所述的三种效应中的像模糊与非大气因素有关, 像闪烁主要是自由大气湍流引起^[2,7], 且对边界层湍流不敏感, 这两种效应不是测量总视宁度的良好对象。像重心运动则是小口径($D \leq r_0$)望远镜中观测到的主要效应, 几乎不受口径尺寸、像差和调焦误差影响, 不要求望远镜有很高的光学质量, 而且重心测量精度很高, 这些特点使它特别适合在野外选址条件下使用。为了消除仪器跟踪误差和振动影响(这些是过去的视宁度测量中的主要障碍), 使用了“差分像运动监测仪”(Differential image motion monitor—DIMM)。即在小口径(一般 $D = 35\text{cm}$)望远镜光瞳面上放置有两个子孔径(5—10cm)的掩模板, 用光楔使同一恒星在焦平面上形成分开的两个像, 测量两像运动的差分, 就消除了跟踪误差和振动, 剩下的就是由于两子孔径处不同的波前倾斜引起的像运动差分。差分像运动方法测得的 r_0 可达很高的精度($< 10\%$)。差分像运动监测仪已成为现代恒星天文选址中视宁度测量的主要手段。从测量差分像运动得到 r_0 的原理、计算和云南天文台的初步实验结果将另文发表。

上述各种测量方法的应用可参阅文献[4], [6]—[8]和[12]—[15]。

五、几点看法

(1) 大区域自由大气湍流的调查分析应查清主要湍流层的起因、强度、高度分布和季节性变化规律。详细的气象资料分析是必要的,还应在普查中进行一定的观测。

(2) 自由大气和边界层湍流贡献之间互补的可能性是存在的。表1中 Mauna Kea 的自由大气湍流强于其他两处,但边界层湍流则远弱于另外两地,使其总视宁度为三者中最佳者。Mauna Kea 边界层湍流弱的原因可能在于高度,因4000m以上是所谓“行星边界层”湍流^[1]。

(3) 重视逆温层调查。伸出逆温层上的山峰可能是有希望的台址。在云南的选址考察中已几次遇到逆温层现象,应进一步了解其成因,分布高度和范围。

(4) 为避免强的边界层(特别是地面层)湍流,应尽量选择地形和地貌简单、平缓的孤立高地以减弱风与地面的剪切;周围一定距离(数公里)内不应再有能引起气流变化的障碍物。

参 考 文 献

- [1] Goodman, J. W., *Statistical Optics*, ed. by J. Wiley and Sons, p. 429, (1985).
- [2] Roddier, F., in *Progress in Optics*, Vol. XIX, ed. by E. Wolf, North-Holland, p. 300, (1981).
- [3] Fried, D. L., *J. Opt. Soc. Am.*, 56 (1966), 1372.
- [4] Sarazin, M. and Roddier, F., *Astron. Astrophys.*, 227 (1990), 298.
- [5] Waldie, A. H. et al., *SPIE*, 926 (1988), 344.
- [6] Roddier, F. et al., *SPIE*, 1236 (1990), 488.
- [7] Vernin, J. and Muñoz-Tuñón, C., *Astron. Astrophys.*, 257 (1992), 815.
- [8] Brandt, P. N. and Righini, A., *LEST Technical Report* (1985), No. 11, 9.
- [9] Roddier, C. and Vernin, J., *Appl. Opt.*, 16 (1977), 2255.
- [10] Vernin, J. and Roddier, F. J., *Opt. Soc. Am.*, 63 (1973), 270.
- [11] Rocca, A., Roddier, F. and Vernin, J., *J. Opt. Soc. Am.*, 64 (1974), 1000.
- [12] Darvann, T. A., Kusoffsky, U. and Zhi, L., *LEST Technical Report*, (1987), No. 25, 40.
- [13] *LEST Technical Report No. 26*, ed. by O. Engvold, Ø. Hauge, p. 17, University of Oslo, (1987).
- [14] *The NNTT Technology Development Program Report No. 8*, The Advanced Development Program, NOAO, p. 52, (1986).
- [15] Sarazin, M., *ESO Scientific Preprint No. 686*, p. 3, (1989).

(责任编辑 林一梅)

Seeing in Modern Astronomical Site Testing

Qiu Puzhang Liu Zhong

(Yunnan Observatory, Academia Sinica, Kunming 650011)

Abstract

New generation telescopes which aim at high resolution imaging of astronomical objects, are putting higher and higher demanding upon the astronomical site with excellent astronomical seeing. Based on the theory of imaging in the turbulent medium, this paper discusses the modern definition of the seeing and the stratified structure of the turbulence as well as the strategy of the site testing. In addition, the measurement of seeing in modern astronomical site testing is introduced briefly.