

天文选址的主要参数及测量方法

侯金良

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

大口径地面光学和红外望远镜必须安装在具有良好大气条件的观测台站才能充分发挥其效率,因此仔细地选择天文观测台址是非常重要的。本文总结了选择一个好的台址需要考虑的各种参数。着重对其中两个最重要的参数即大气视宁度和大气积分水汽含量的各种测量方法作了介绍。最后提出了在天文选址中要注意的一些基本事项。

天文学家取得的重大成就大多与观测设备的改进有关,如新技术望远镜的设计,高灵敏度探测器的应用等。但好的设备必须安装在具有优良大气条件的台址才能充分发挥其效率。为此天文学家不仅精心设计地面大望远镜及其圆顶,而且花费了大量时间来选择一个好的台址。很显然随着观测设备的改进,大气的影晌将越来越突出。经过本世纪60年代和80年代天文界的两次选址运动,人们对如何来选择一个好的天文观测台址,用什么样的参数来衡量一个台站质量等都有了很好的认识^[1-4],同时选出了一批观测实践证明质量优秀的观测台站,如美国夏威夷的 Mauna Kea,智利的 La Silla, Paranal, 美国亚利桑那的 Mt. Graham 等。

一般来讲,天文选址中需要评估、测量的参数可以分为以下三个部分:

- (1) 普查参数,主要有:
 - (i) 气候情况(如云量、日照、年降水量等)
 - (ii) 地形
 - (iii) 光和大气污染情况
 - (iv) 地震活动
 - (v) 都市化趋势
- (2) 定点观测参数,主要包括:
 - (i) 大气视宁度质量(大气湍流分布)
 - (ii) 大气积分水汽含量
 - (iii) 消光和天空背景(夜天光)
 - (iv) 气象学参数(风、温度、相对湿度以及大气逆变层高度)
- (3) 其他参数,如:

(i) 地理位置

(ii) 水电供应、交通情况

(iii) 与总部的距离

选址工作的第一步，就是要在众多的候选区域中选出值得进一步详细测量的少数候选点，这些候选点的选择，不仅要考虑大尺度气候情况，而且还要考虑对天文观测的意义。一般的方法是通过当地气象资料来分析、筛选，然后对几个确定的候选点进行定点观测。在定点观测中最重要的参数是云量（主要是夜间）、大气视宁度质量和积分水汽含量。云量影响到所有地面光学和红外天文观测，大气视宁度质量反映光学天文成像的质量，水汽关系到红外和亚毫米波天文的地面观测。定点测量通用的方法是通过中等口径望远镜系统地测量恒星像的特性。一般的测量应满足以下两点：

(1) 用合适的露光或积分时间。湍流大气中光波波前的涨落包含很宽的频率范围。原则上用仪器测量时应能记录下所有的频率成份。为获得高频涨落，探测器必须要有足够的时间响应；为得到低频信息以及保证所得到的结果有足够的统计精度，必须要有一定的积分时间。

(2) 直接测量波前相干特性。任何在望远镜像平面上的测量都受到仪器本身的影响（如口径大小、成像误差、跟踪误差等）。为了得到可靠的结果应该尽量减少这些因素的影响，因此，直接从孔径平面上测量应是最佳选择。

下面我们将主要介绍大气视宁度和水汽含量这两个参数的测量方法。

1 大气视宁度的测量

1.1 天文方法

所谓天文方法，就是用一定口径的望远镜来测量研究星像的直径或者测定大气的传递函数，从而确定大气视宁度参数。在天文选址中用到的成像方法主要有：

- 传统方法：目视观测衍射环，观测恒星像闪烁^[5]，恒星照相拖影^[6,7]，光电测量如星像刀边扫描，多缝旋转扫描^[8]。
- 较差测量：较差像运动测量仪^[9,10]。
- 干涉方法：斑点干涉术测量斑点像空间谱^[11]，错位干涉测量仪^[12]，干涉测量视宁度监视仪^[13]。

1.1.1 目视、照相拖影和光电测量

这是早期选址中使用的方法。目视观测星像的衍射环来估计站址的大气视宁度质量，只能得到定性的结果，这需要观测者有丰富的经验。对恒星像进行照相拖影，由于仪器及方法都较为简便，可应用于设施较差的站址。一般都对北极星进行拖影，也有对其他恒星进行拖影。简单的处理方法是根据星像在底片上的拖影轨迹，测星像的横向运动方差，再换算成大气视宁度参数 r_0 。对于小口径望远镜，大气抖动引起的像质退化主要表现为星像位置的变化，拖影测得的抖动可通过下式换算成 r_0 参数

$$\sigma_m = k\sqrt{2}\sigma^{ph} \quad (1)$$

$$\sigma_m^2 = 0.358(\lambda/r_0)^{5/3}(\lambda/D)^{1/3} \quad (2)$$

其中 k 为照相抖动和光电测得的抖动之间的定标系数, λ 为测量波长, D 为望远镜口径。作为相对比较, 只要用同一类型仪器测出不同站址的照相抖动 σ^{ph} 即可。但要换算成视宁度参数 r_0 则需要确定系数 k , 即要定标。Walters^[7] 等人提出了用平均线扩展函数来处理拖影的新方法, 其基本思想是: 恒星拖影这一过程类似于狭缝成像, 垂直于拖影方向的亮度分布代表了整个系统的线扩展函数, 而在一定时间内的平均线扩展函数则正比于垂直拖影方向的平均能量分布。因此用密度扫描仪(如 PDS) 测出能量分布(通过密度定标转换), 就可以获得线扩展函数, 后者的傅里叶变换就是系统的调制传递函数。扣除仪器系统的传递函数, 就可以获得大气传递函数, 从而可以直接确定大气视宁度参数。

一般地说, 拖影的拍摄应具备以下要求:

- (i) 望远镜有效焦距长, 对焦精确, 安装稳定;
- (ii) 拍照时尽可能减少圆顶的影响, 最好没有;
- (iii) 底片显影均匀;
- (iv) 能对底片定标;
- (v) 有条件测仪器的传递函数;
- (vi) 要进行光电测量和拖影测量之间的定标。

其中 (iv)、(v) 在用传递函数方法时必须满足。(vi) 在进行抖动和大气视宁度参数换算时应该满足。照相拖影的最大缺点是工作量大且繁, 目前已很少再用。光电方法与拖影相比改进了接收器, 由于一般都用数字方式来接收星光, 因而时间响应快, 灵敏度高, 数据处理亦较方便。常用的有刀边扫描和多缝旋转扫描两种专用视宁度测量仪。

1. 1. 2 较差像运动测量方法

80 年代初开始的欧洲南方天文台甚大望远镜 (VLT) 选址中使用的主要仪器之一就是首先由 Roddier 等人提出的较差像运动测量仪 (DIMM)。它的中心思想是在中等口径 (~30cm) 望远镜孔径上放置一 Hartmann 屏, 测量屏上相隔一定距离两小孔之间的波前倾斜, 从而获得大气视宁度参数。

设屏上两小孔直径为 D , 孔中心之间的距离为 d , 由于在焦平面上两小孔所成像中心之间的相对运动可以分解成两个方向: 径向和横向, 根据湍流大气中像形成理论可以推出径向和横向运动的方差分别为^[9]: ($d \geq 2D$)

$$\sigma_r^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}] \quad (3)$$

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}] \quad (4)$$

注意到公式 (2) 是用单孔径测量得到的两维像运动方差, 代入 (3) 和 (4) 可得

$$\sigma_r^2 = [1 - 0.541S^{-1/3}] \sigma^2 \quad (5)$$

$$\sigma_t^2 = [1 - 0.811S^{-1/3}] \sigma^2 \quad (6)$$

其中 $S = d/D$ 。

由于 σ^2 同 r_0 直接相关, 因此只要在某一 S 下 (满足 $S \geq 2$) 测出 σ_1^2 和 σ_t^2 就可以得到两组独立的 r_0 测量值。 σ_1 和 σ_t 不同, 反映了湍流大气对像影响的不完全各向同性性质。

实际测量是这样进行的: 在一定的时间内获取一系列短露光像 (一组样本), 测出每次短露光中同一恒星两个像的相对运动 (径向和横向), 对这一组样本进行统计分析获得相对运动的方差, 从而可以利用公式 (5) 和 (6) 来计算大气视宁度值, 并进行相应的误差分析。在露光时间长短及样本大小的选取中要注意的是:

(i) 样本要足够大使得统计分析有意义;

(ii) 总的露光时间 (近似于样本数目乘以单次露光时间) 要适当, 使得在这一段时间内大气的统计特性是平稳的;

(iii) 单次露光时间足够短。

经验和实测表明, 大气特性在 1 分钟量级内基本是平稳的, 因此假如单次露光时间为 10ms, 则在 1 分钟内可以获得的样本数目为 600 幅, 考虑到对每幅照片计算机实时处理所需时间, 取得 200—300 幅样本是合理的。

差分技术对仪器跟踪误差不敏感, 获得的结果是纯大气产生的。但是这一技术对尺度大于孔间隔的大气涨落也不敏感, 因此对像运动有贡献的是相对较小尺度的涨落。另一方面由于露光时间有限, 对高频涨落必然也有一定衰减, 所以差分像运动测量倾向于低估实际像运动。

1. 1. 3 干涉方法^[11-13]

干涉测量方法的特点是直接测定波前扰动, 它不受望远镜光学系统影响。这样的方法不仅可以测量像运动的轮廓及视宁度参数, 而且可以测出其他大气参数如大气相干时间和大气等晕角等。大气的相干时间和等晕特性与干涉仪与自适应光学系统的极限性能有密切相关, 也是选址中需要考虑的参数。

1. 2 非天文方法, 直接测量大气参数

根据湍流大气中成像理论, 大气视宁度参数 r_0 与大气中折射率结构常数 C_N^2 有以下关系^[3]:

$$r_0 = \{0.423 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \sec z \int_0^\infty C_N^2(h) dh\}^{-3/5} \quad (7)$$

其中 z 为天顶距, λ 为波长。 C_N^2 随高度 h 的分布反映了湍流大气的结构。观测表明 C_N^2 具有层状结构特征, 不同高度范围的 C_N^2 要用不同的方法来测量。

(1) 近地面 C_N^2 轮廓测量: 对于几十米以下的大气湍流分布可用安装在塔上的微温度传感器进行测量。在塔上不同高度的地方, 水平地安装相隔一定距离的微温度计, 以测量温度涨落的垂直轮廓 C_T^2 以及对应的压力、温度, 通过下式可以得到对应的湍流分布 C_N^2

$$C_N^2 = (77.6 \times 10^{-6} P/T^2)^2 C_T^2 \quad (8)$$

(2) 中层大气 C_N^2 轮廓测量: 在几十米到 1km 以下范围的大气湍流分布, 可以用声雷达进行测量。声雷达按一定的频率和强度垂直向上发送声波脉冲, 由于大气中温度结构、风场和湍流的作用, 发出的声束发生散射, 用接收机接收回波强度, 平均说来这一强

度正比于温度结构常数,从而可根据(8)式得到 C_N^2 分布。由于声脉冲有一定的宽度,声雷达必然有一个盲区,这一范围从几米到几十米不等,依赖于声雷达性能。

(3) 高层大气 C_N^2 轮廓测量:对于 1km 以上的湍流分布一般都用闪烁测量仪来测定。如 SCIDAR(Scintillation, Detection, and Ranging) 方法^[14]。它主要是通过统计分析双星产生的闪烁来得到 C_N^2 , 由于闪烁是 Fresnel 衍射产生的, SCIDAR 所反映的是高层大气湍流的贡献。观测表明,在许多情况下高层大气湍流的相对贡献为 50%—30%,有时则仅为约 10%^[15]。

非天文的方法最早应用于西班牙 Canarys 群岛选址中^[16],当时是用球载微温度计来测量大气中温度涨落。在以后的大望远镜选址中,这种方法得到了很好的应用和发展。只有通过测量湍流的垂直分布才能了解引起像质退化的原因,并设法加以避免。由于大气视宁度参数与 C_N^2 分布有关,而 C_N^2 可以用大气特性参数如风场、温度梯度等来表示,因而也可联系到常规气象观测参数。尽管建立一种普遍的关系较为困难,但从气象资料出发去建立一定的模型还是可能的^[17],这样至少可以得到以下好处:

- (1) 统计分析常规气象资料可作为一种天文选址的手段;
- (2) 通过相对较为简单的气象观测,就可以估计站址的大气视宁度质量;
- (3) 用常规气象预报的方法去预测站址的视宁度,从而大大提高天文观测的效率。

2 大气中水汽含量的测量方法

2.1 辐射测量仪

假设天空平均辐射可用等效亮温度 T_{sky} 表示,则大气辐射转移产生的辐射温度 T_{out} 为:

$$T_{\text{out}} = T_{\text{sky}}(1 - e^{-\tau_0 \sec z}) \quad (9)$$

其中 τ_0 为天顶方向的大气光学深度, z 为天顶距。上式亦可写成:

$$\ln(T_{\text{sky}} - T_{\text{out}}) = \ln T_{\text{sky}} - \tau_0 \sec z \quad (10)$$

从地面站上每隔一定时间间隔测定不同天顶距下的 T_{out} 值,而 T_{sky} 则可用模型大气及实验室定标给出,当各次 T_{out} 和 T_{sky} 的差值的对数作为 $\sec z$ 的函数绘在图上时,对同一波长的辐射来说,这些点将趋于落在一直线上。通过多次测量及迭代,就可以得出天顶方向大气光学深度及天空平均辐射温度。光学深度的大小反映了路径上积分水汽含量的多少。

2.2 水汽柱密度计^[18]

以太阳或月球为光源,在近红外 4 个波段进行测量,两个波长位于水汽吸收带内,另两个位于附近连续区。测出吸收线的强度就可以换算成路径上的积分水汽含量。这种测量仪器有时只能用在白天,有时则只能用在夜间使用,因此较难得到周日变化。仪器测量精度与定标有关,一般地讲柱密度计对低水汽含量不易测准。

2.3 高空气象资料

高空气象资料包括从地面到对流层顶的不同等压面的高度、温度、温度露点差等参数。设相邻两等压面的高度分别为 h_i 和 h_{i+1} ，用这两个高度处的水汽密度平均值代替这一区段内的水汽密度，则水汽含量 w 为：

$$w(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) = \int \rho(h)dh = 0.661 \sum_i (h_{i+1} - h_i) \left[\frac{\alpha_i}{273.15 + T_i} + \frac{\alpha_{i+1}}{273.15 + T_{i+1}} \right] \quad (11)$$

其中 $\alpha_i = \exp\left(\frac{17.5T_{di}}{241.5 + T_{di}}\right)$ ， T_i 和 T_{di} 分别为等压面 i 的温度及温度露点差。由于高空气象资料受放球地点的限制，有时不能满足定点选址的要求，除非在选址点进行专门的高空气象观测。在选址的普查阶段可以利用气象部门的高空气象资料来计算某些地区的水汽含量。由于这样的资料比较多，因此有条件进行长周期的统计分析。

2.4 天空辐射的红外遥测

在气象卫星上遥测大气辐射，从而推算出大气中水汽总含量。由于卫星较难测到低层大气的辐射，遥测得到的是较高层大气的水汽含量，必须通过适当的反演方法推算总含量。另外，卫星观测分辨率有限，因而只能用在普查阶段。

3 天文选址中一些注意事项

(1) 大气湍流是一种随机现象，天文视宁度参数随时间、地点不断变化，因此要使观测有统计意义，必须进行至少一年的长期观测。短周期的观测也是可行的，但必须将光学、气象学等方法联合使用，这样的观测可以在短时间内测定大量参数^[19]。

(2) 为了寻找最好的站址，了解像质退化的原因，必须测量不同高度湍流的分布，这要求选址人员掌握各种测量不同高度湍流分布的方法和技术。

(3) 不同候选点观测时应尽量使用同一类型的仪器，以便相互比较。同一站址上使用不同设备测量时，必须研究其相互比较、定标等问题。

(4) 望远镜圆顶的设计好坏对成像质量有很大影响。设计优良的圆顶对视宁度的相对贡献可小于 1/10，而不好的圆顶则可达 1/3。这说明在选址中尽可能不使用圆顶。

(5) 每一站址在经过一定时间的测量后，应该合理地估计出不同高度大气湍流对像质的相对贡献，并找出湍流分布与局地气象参数及时间的经验关系，建立合理的湍流—视宁度模型，并用此模型来预测站址的视宁度质量。

(6) 天文选址工作往往是在不利的环境下进行的。观测工作既辛苦、乏味而又漫长，因此要求观测人员责任心强，有为事业献身的精神。

致谢 本文在写作过程中得到了傅承启、蒋栋荣、苏洪钧以及天文选址专家组成员张柏荣、黄永伟、黄寅亮和李开华等同志的帮助，在此致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Fried D L. J. Opt. Soc. Am., 1966, 56: 1372
- [2] Young A T. Ap. J., 1974, 189: 587
- [3] Roddier F. Progress in Optics, 1981, 19: 281
- [4] Columan C E. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1985, 23: 19
- [5] Vernin J, Roddier F. J. Opt. Soc. Am., 1973, 63: 270
- [6] Harlan E A, Walker M F. Publ. Astron. Soc. Pac., 1965, 77: 246
- [7] Walters D L, Favier D L, Hines J R. J. Opt. Soc. Am., 1979, 69: 828
- [8] McInnes B, Walter M F. Publ. Astron. Soc. Pac., 1974, 86: 529
- [9] Sarazin M, Roddier F. Astron. Astrophys., 1990, 227: 294
- [10] Martin H M. Publ. Astron. Soc. Pac., 1987, 99: 1360
- [11] Schneiderman A M, Karo D P. J. Opt. Soc. Am., 1978, 68: 348
- [12] Roddier C, Roddier F. In: Millis R L, Franz O G, Albes H D, Dahn C C eds. Identification, optimization, and protection of optical telescope sites, International conference, Flagstaff, Arizona, USA, 1986, Flagstaff: Lowell Observatory, 1987: 77
- [13] Nightingale N S, Buscher D F. M.N.R.A.S., 1991, 251: 155
- [14] Vernin J. In: D'Odorico S, Swings J-P eds. Proceedings of ESO conference and workshop, No.24, Venice, 1986, [s.l.]: the European Southern Observatory, 1986: 297
- [15] Columan C E. In: Millis R L, Franz O G, Albes H D, Dahn C C eds. Identification, optimization, and protection of optical telescope sites, International conference, Flagstaff, Arizona, USA, 1986, Flagstaff: Lowell Observatory, 1987: 2
- [16] Barletti R, Ceppatelli P L, Righini A, Speroni N. J. Opt. Soc. Am., 1976, 66: 1380
- [17] Columan C E, Andre J C, Lacarrere P, Gillingham P R. Publ. Astron. Soc. Pac., 1986, 98: 376
- [18] Buscher E, Lemke D. Infrared Physics, 1980, 20: 321
- [19] Roddier F. In: D'Odorico S, Swings J-P eds. Proceedings of ESO conference and workshop, No.24, Venice, 1986, [s.l.]: the European Southern Observatory, 1986: 261

(责任编辑 刘金铭)

Site Testing Parameters and Their Measurements

Hou Jinliang

(Shanghai Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

Selecting a good site for ground-based astronomy is very important. This paper gives a summary of site testing parameters and their measurements. It mainly concentrates on the measurements of atmospheric seeing and integrated atmospheric water-vapour content since the quality of a site is mostly determined by these two parameters. We also present some care-must-be items in site-testing campaign.