

文章编号: 1000-8349(2010)04-391-13



天文台址大气光学湍流探测技术

刘立勇^{1,2,3}, 姚永强^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 光学天文重点实验室, 北京 100012; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 综述了大气光学湍流探测技术的最新进展, 对近年来光学湍流探测设备进行简要总结。通过对光学湍流特征参数的介绍, 分析了大气光学湍流探测在天文观测中日趋重要的作用。重点介绍了微温脉动仪、DIMM、MASS、SCIDAR 等技术的原理与观测。总结国内大气光学湍流探测技术的现状, 展望其在天文领域应用的未来发展趋势。

关键词: 天文选址; 视宁度; 光学湍流廓线

中图分类号: P111 **文献标识码:** A

1 引 言

星光到达望远镜观测设备之前首先要经过地球大气层, 大气湍流效应会严重影响光学成像系统的观测质量^[1-4]。人们通常把大气温度或大气密度随机起伏而引发的折射率场的湍动称为大气光学湍流^[5-7]。大气光学湍流是具有不规则结构的多尺度非线性系统^[8-10], 大气折射率结构常数是重要的大气光学特性参数。

大气湍流活动是天文学家和大气物理学家共同关注的研究课题, 但天文学家更关心湍流大气对天文观测的实际影响^[11,12]。天文选址对于任何规模的地面望远镜建设和运行来说, 都是其前期至关重要的基础性工作, 对大型观测设备尤为重要。下一代天文观测设备日益大型化、复杂化, 投资规模庞大, 须安置在具有观测优势的台址上才能充分发挥其作用, 获得最大的科学产出。大气光学湍流对天文观测的影响程度已经成为地基天文观测选址的首要考核指标^[13-17]。

现代天文选址要求对候选台址上空的大气湍流及其运动特征, 尤其是大气光学湍流分层特性, 进行更加细致精确的研究, 以发展自适应光学技术和干涉技术。例如, TMT 望远镜自

收稿日期: 2010-04-01; **修回日期:** 2010-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10903014, 10778709); 中国科学院国家天文台青年人才基金资助项目

适应光学系统设计, 要求从地面到 30 km 高度的大气光学湍流廓线观测资料, 空间分辨率要达到 500 m, 时间分辨率要达到几秒。大气光学湍流探测技术的发展将不仅为天文台址的选择提供参考依据, 而且还可为自适应光学系统的设计、大气光通讯技术等光学工程应用提供支持, 也为大气湍流理论研究提供宝贵的基础数据。

在早期的天文选址和台址评价中, 局限于当时观测设备的水平, 大气光学湍流的影响没有得到足够的理解; 光学湍流的探测手段较简单, 以表征大气整层积分湍流强度的相干长度(视宁度)的测量为主。在观测方法上, 也有较大局限性, 如目视观测法、目视望远镜衍射环法等都存在人为误差, 即使是非常有经验的专业人员观测, 其观测结果也只能作为定性评价。随着望远镜及其后端技术的发展, 特别是自适应光学技术在天文观测中的进一步应用, 大气光学湍流特性越来越受天文界的重视^[11,18]。大气相干长度仅仅表征整层大气的湍流活动强度, 单一的相干长度测量已经不能满足大型望远镜建设台址评价的要求, 大气光学湍流分层结构、等晕角、相干时间、外尺度等已成为大型光学望远镜建设台址评价的必需参量。近 20 年, 各种新型的光学湍流探测技术逐步得到发展并应用于天文选址和已有台址的评价中。

2 大气光学湍流特性

影响天文观测的大气光学湍流主要分布在地面以上 30 km 以内, 一般分为三部分: 近地面层湍流、边界层湍流、自由大气湍流^[19]。近地面湍流发生在从地面到离地面几百米高度范围, 这部分的湍流活动受到地形、植被及建筑物布局的严重影响; 边界层湍流一般发生在几百米到 1 km 的对流层的低空范围; 自由大气层湍流一般在 1 km 以上, 在对流层顶的湍流活动较强, 而基本上不受地面状况的影响。大气光学湍流破坏了光波的相干性, 相位和振幅的改变都会严重影响光的传播和光学成像的质量。表征大气光学湍流的参数很多, 与天文观测相关的主要有大气相干长度 r_0 , 大气相干时间 τ_0 , 等晕角 θ_0 和外尺度 L_0 等。

2.1 大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$

大气折射率起伏会导致光传播在波前上的振幅和相位产生随机起伏。大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$ 是描述大气折射率起伏强度的指标, 一般称作大气光学湍流活动强度^[20]。大气折射率与大气温度、湿度、气压有关, $C_n^2(h)$ 会随高度和时间发生变化, 可以通过测量气象参数或大气闪烁序列来对其统计特性进行研究。

大气折射率结构常数是详细的大气湍流强度分布的物理量, 直接提供湍流大气中的湍流分层信息, 为自适应光学提供必要的改正参数。此外, 由大气折射率结构常数能够导出大气相干长度、相干时间、等晕角等参量。

2.2 大气相干长度 r_0

大气相干长度是描述大气光学湍流空间尺度的特征参量。Fried 在研究光波湍流大气传播的传递函数过程中定义了参数 r_0 , 来描述光波的大气扰动导致像质退化的程度, 因此 r_0 又被称为 Fried 常数^[21,22]。大气相干长度与折射率结构常数有着非常密切的关系, r_0 是对整层大气湍流强度廓线 $C_n^2(h)$ 的积分。大气相干长度在可见光波段的典型值是 10 cm, 变化范围一般在 4~25 cm。

在天文观测中, 星像由于大气湍流活动的影响而看起来变得模糊, 天文上称之为视宁度。

对于一定的观测波长, 大气相干长度越短, 视宁度越差, 表征大气湍流活动越强, 望远镜的光学成像质量也越差。因此大气相干长度已经成为衡量可见光波段和红外天文台址的一个常用参量。

2.3 大气相干时间 τ_0

星光通过湍流大气造成了波前的瞬时畸变。根据泰勒的湍流“冻结”假设, 波前的畸变在短时标内是基本保持不变的, 这个时标即是大气相干时间 τ_0 。大气湍流层在 τ_0 时间内, 湍流特性被认为是一致的, 由风速作用而被“冻结”着平移, 其波形不发生畸变。大气相干时间在可见光波段的典型值是 5 ms。

因此在天文观测中, 大气相干时间 τ_0 决定了自适应光学系统设计的响应参数, 即自适应光学系统的波前传感器探测频率和改正镜的响应频率必须大于 $1/\tau_0$, 才能对大气光学湍流造成的扰动进行实时改正^[23]。否则, 自适应光学系统将不能对大气湍流效应进行有效改正。

2.4 等晕角 θ_0

等晕角的含义是指在观测视场小于 θ_0 的区域内, 湍流大气局部均匀和各向同性, 星光经过湍流大气所引起相位畸变被认为是等同的^[24]。超出了等晕角范围, 所进行的相位屏测量就会发生很大的变化。

等晕角 θ_0 在自适应光学天文观测中的意义在于观测目标与导星之间的夹角应确保小于等晕角 θ_0 ; 只有满足该条件, 才可利用亮星作为导星对观测目标做实时的自适应校正。等晕角对自适应光学系统的影响很大, 在可见波段等晕角相当小, 只有几角秒, 而到了近红外波段, 等晕角可以达到 $20'' \sim 30''$, 因此红外波段的自适应光学改正要比可见光波段容易得多。望远镜台址的等晕角参数是进行高分辨率天文观测选源的重要依据。

2.5 外尺度 L_0

根据 Tatarskii 的大气湍流统计理论, 对于局部均匀各向同性湍流中存在着一个惯性子区间 ($l_0 \ll r \ll L_0$), 湍流外尺度 L_0 是湍流非各向同性的边界和湍流惯性子区的上界, 也可理解为能量注入的尺度^[25,26]。湍流外尺度对大气湍流统计特征测量的影响是不容忽视的, 在大气光学及其应用研究中, 湍流的特征外尺度起着重要的作用^[27]。

由于大尺度湍流对光波的相位起伏起主要作用, 因此在天文观测中以相位补偿为手段的自适应光学技术依赖于大气湍流外尺度的准确测量^[28]。研究表明, 对于大口径望远镜, 有限的大气外尺度对大气湍流的天文观测改正有很大的影响。

3 大气湍流探测方法

国际选址领域已经发展了多种大气光学湍流的探测方法。WFS (WaveFront Sensor)^[29]、PSF (Point Spread Function) analysis^[30]、Scanning scint^[31]、Scintillometers^[32]、Interferometers^[33] 等方法发展较早, 在早期的台址评价中得到了较好的应用。常见的 DIMM (Differential Image Motion Monitor)^[34]、MASS (Multi-Aperture Scintillation Sensor)^[35]、Micro-Thermometry (Ballon)^[36] 等方法, 已广泛应用于世界各地天文选址工作中。SCIDAR (Scintillation Detection and Ranging)^[37]、GSM (Generalized Seeing Monitor)^[38]、SHABAR (Shadow Band Ranger)^[39]、SLODAR (Slope Detection And Ranging)^[40]、SNODAR (Surface layer Non-Doppler Acoustic Radar)^[41] 等也根据不同望远镜的选址需要, 得到了较多的应用。

LuSci (Lunar Scintillometer) [42] 和 Single Star SCIDAR [43] 等作为最新发展的光学湍流探测技术也在近几年投入应用。在近 20 年来的世界大型望远镜选址工作中, 上述设备均以不同的组合在大气光学湍流的台址评价中得到了应用。

表 1 各种大气光学湍流探测设备及其测量的大气参数和分辨率

	$C_n^2(h)$	$v(h)$	分辨率	r_0	τ_0	L_0	θ_0	地表层
DIMM	no	no	—	Y	Y	N	N	Y
MASS	yes	no	Low	Y	Y	N	Y	Y
SCIDAR	yes	yes	Low	Y	Y	N	Y	N
G-SCIDAR	yes	yes	Low	Y	Y	N	Y	Y
Ballons	yes	yes	High	Y	Y	Y	Y	Y
GSM	no	no	—	Y	Y	Y	Y	Y
WFS	yes	yes	Low	Y	Y	Y	Y	Y
PSF analysis	no	no	—	Y	N	N	Y	Y
Scanning scint.	yes	yes	Low	Y	Y	N	Y	Y
Scintillometers	yes	yes	Low	Y	Y	N	Y	Y
Interferometers	no	no	—	Y	Y	Y	Y	Y
SHABAR	yes	—	Low	Y	Y	N	Y	Y
SLODAR	yes	—	Low	Y	Y	N	Y	Y
SNODAR	yes	yes	High	Y	Y	N	Y	Y
LuSci	yes	—	Low	Y	Y	N	Y	Y

表 1 总结了上述探测技术对于湍流廓线 $C_n^2(h)$ 、风速廓线 $v(h)$ 、空间分辨率、近地面层湍流以及 r_0 、 τ_0 、 θ_0 和外尺度 L_0 等光学湍流特征参数的探测能力的详细统计。其中 Micro-Thermometry (Ballons) 和 SNODAR 具有较高的空间分辨率, SCIDAR 能够较长期监测整层大气湍流的活动, 而便携式的 DIMM 应用最广泛。本文将对较常用的 Micro-Thermometry、DIMM、MASS 和 SCIDAR 等大气光学湍流探测技术给以详细介绍。

3.1 DIMM

DIMM 测量视宁度的方法最早由 Sarazin 和 Roddier 提出 [34], 是通过星像波前倾斜的相对起伏来计算视宁度。具体实现是在 1 个小口径望远镜 (20~35 cm) 入瞳处放置 2 个子瞳的截屏罩, 其中 1 个子瞳安装光楔, 使 2 个子瞳在望远镜焦面的星像有合适的分离。望远镜焦面配置 CCD, 快速采集双星像图像, 并同步由控制计算机存储并统计双星像的位置信息。设 2 个子瞳的直径为 D , 子瞳中心之间的距离为 d , 在焦平面上 2 个子瞳所成星像之间的相对运动可以分解成两个方向: 径向和横向, 根据湍流大气中的光传播理论可以给出径向和横向运动的方差, σ_l^2 和 σ_t^2 分别为径向、横向两子瞳方向的星像运动的方差; λ 为观测波长; r_0 是大气相干长度。

$$\sigma_l^2 = 2 \left(0.179 D^{-1/3} - 0.096 8 d^{-1/3} \right) \lambda^2 r_0^{-5/3}, \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = 2 \left(0.179 D^{-1/3} - 0.145 d^{-1/3} \right) \lambda^2 r_0^{-5/3}. \quad (2)$$

r_0 和星像亮度半峰值全宽 FWHM (Full Width at Half Maximum) 有如下关系:

$$\text{FWHM} = 0.98\lambda/r_0 \quad (3)$$

DIMM 使用便携的小口径望远镜, 可以方便地获得大气相干长度 r_0 , 并且由于采用星像较差运动算法, 避免了望远镜导星和本身抖动带来的误差, 因此得到了最广泛应用, 已经成为国际天文选址和台址监测的必需设备。但 DIMM 的监测结果只能给出大气湍流活动的整层积分结果, 缺乏大气湍流的分层信息, 不能对一个台址的光学湍流特性进行细致评价。

近年来 DIMM 在国内外已有台址评价中得到广泛的应用, 如 ESO(欧洲南方天文台) 在智利的 VLT (Very large telescope) 台址^[34], 美国在夏威夷岛的 NNTT (National New Technology Telescope) 望远镜台址^[44], 日本在夏威夷岛的 Subaru 台址^[45], 云南天文台在丽江 2.4 m 望远镜台址^[46]。正在进行中的美国 TMT (Thirty Meter Telescope) 选址^[47], ESO 的 ELT (Extremely Large Telescope) 选址^[48], 南极 DOME C 选址^[49], 国家天文台西部天文选址项目^[50]等, 都采用了 DIMM 测量视宁度。

图 1 是国家天文台西部天文选址项目研发的 DIMM 系统, 以及该设备在兴隆观测站的视宁度观测结果。整夜观测采样 1 337 组数据, 观测视宁度有良好的连续性, 表明观测现场的天气条件非常稳定。视宁度值的时间分布表现出整体的下降趋势, 中值为 0.7 "。

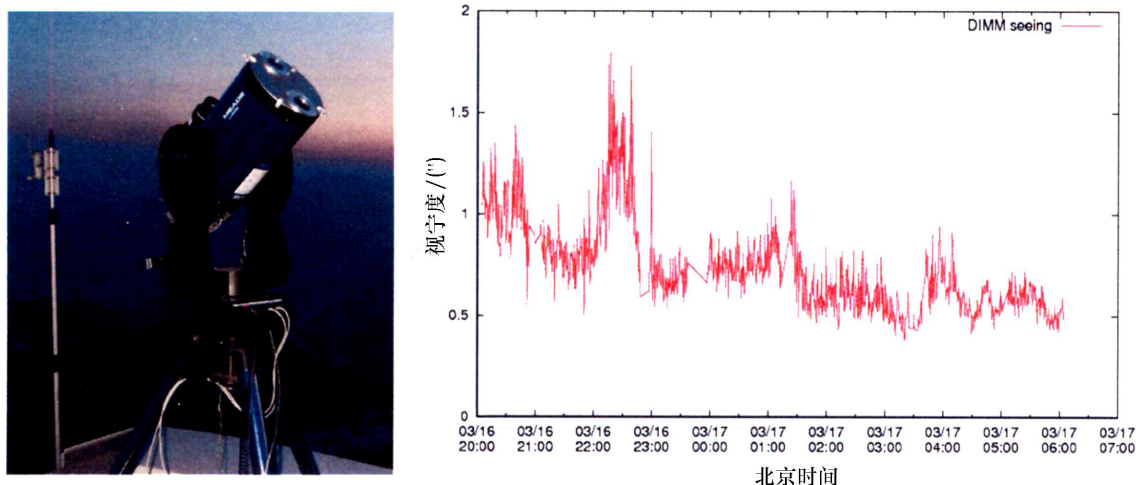


图 1 国家天文台 DIMM 设备和 2007 年 3 月 16 日在兴隆观测站的视宁度观测结果

3.2 MASS

MASS 是一种低分辨率的大气湍流分层观测设备, 通过测量 4 个环形孔径光学系统接收星光闪烁可以得到 C_n^2 廓线。其原理是各组孔径的相关权重函数只对对应高度的湍流层所引起的闪烁方差敏感, 通过设计一系列的孔径, 即可给出 C_n^2 廓线^[51]。MASS 的优点是对望远镜口径要求不大, 整个设备携带方便, 但缺点是高度分辨率较低。

图 2 是 MASS 观测的原理示意图和国家天文台西部选址项目进行的 DIMM-MASS 实验。当星光通过孔径为 2 cm、4 cm、6 cm 和 8 cm 的光学系统, 由 4 个光电倍增管分别获取闪

烁信息。通过计算机对不同高度的闪烁信息进行反演,可以获得 0.5 km、1 km、2 km、4 km、8 km 和 16 km 高度上的 6 层大气湍流活动情况。

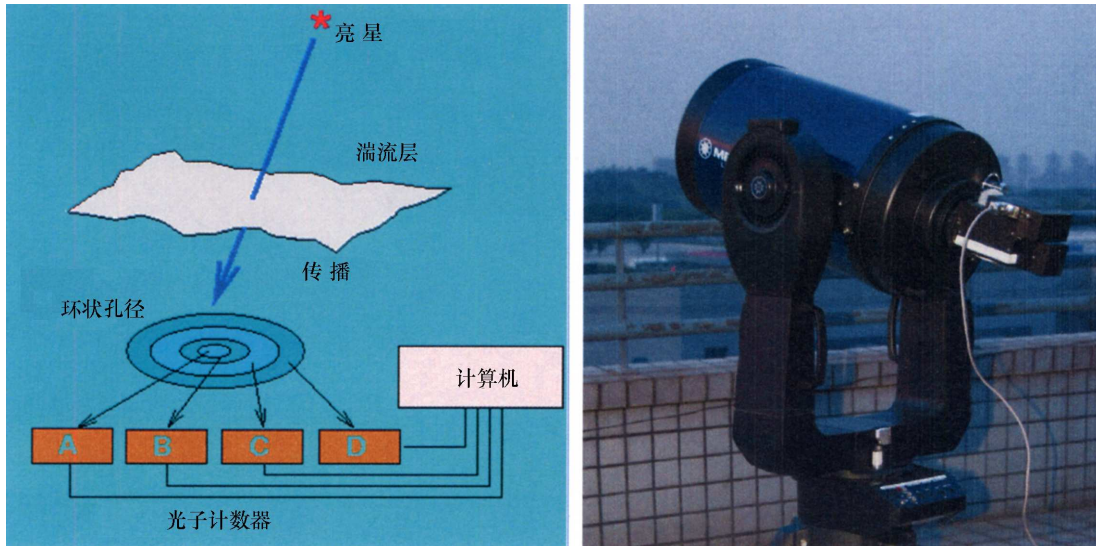


图 2 MASS 原理示意图和国家天文台 DIMM-MASS 实验

图 3 是利用该设备在 2004 年 9 月 30 日对 CTIO (Cerro Tololo Inter-American Observatory) 的 Cerro Tololo 台址进行夜间湍流观测的例子^[51]。可以看出整个夜间大气湍流活动在 4 km 和 8 km 的高度活动较为强烈。

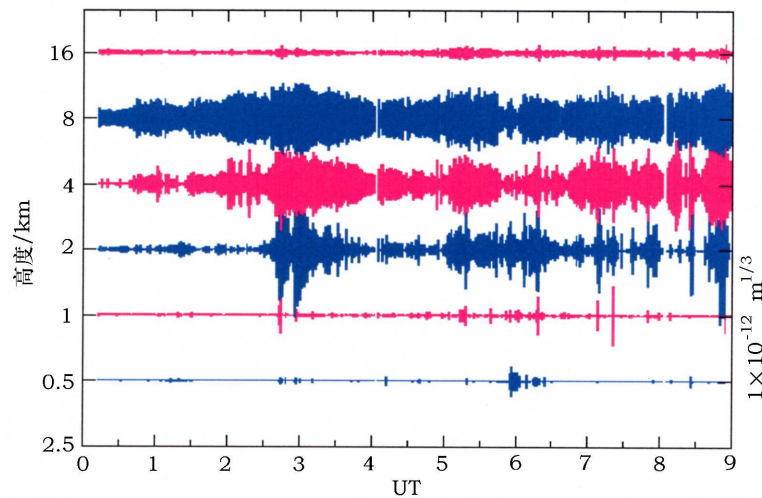


图 3 2004 年 9 月 30 日在 CTIO 的 Cerro Tololo 台址 MASS 观测结果^[51]

DIMM-MASS 是 2000 年以后发展起来的一项新型探测技术^[52]。MASS 可以观测得到地面以上 30 km 范围内 6 层高度的大气折射率结构常数,但对近地面层 1 km 以内不敏感;而 DIMM 可以获得整层大气的湍流积分值。通过配置 MASS 和 DIMM 同时观测,利用 DIMM

测量整层大气湍流强度的特点, 可以同时获得近地面层湍流分布和 1 km 以上自由大气层的湍流活动情况。

3.3 SCIDAR

SCIDAR 是目前最为细致的大气湍流廓线探测方法, 可以探测从地面到离地面 30 km 高度上整个大气层的大气光学湍流廓线和风廓线, 垂直分辨率较高。早在 20 世纪 70 年代 Vernin 和 Roddier 提出了 SCIDAR 的概念^[53], 真正的技术实现和观测应用集中在近十几年, 1998 年, Fuchs, Vernin 等人发明了 Generalized SCIDAR 方法来克服 Classical SCIDAR 对近地面探测不敏感的缺点^[54], Avila 等人实现了 Generalized SCIDAR 技术, 给出从地面到高空整个大气层的湍流廓线及风廓线^[55]。2000 年以来, Vernin 等人提出 Single Star SCIDAR (SSS) 概念, 并获得初步观测结果^[43], SSS 技术可在 40 cm 口径的小型光学望远镜上实现观测。SCIDAR 技术对于天文选址、自适应光学应用、大气物理研究和空间目标监视, 有重要的使用价值。

SCIDAR 方法对星光经过大气产生的闪烁图像快速记录 (小于 1 ms), 获得的闪烁图像进行自相关和互相关处理, 反演出湍流的垂直分布廓线。图 4 是 G-SCIDAR 的原理示意图^[55], 根据大气湍流理论, 望远镜观测双星时, 夹角很小的两颗恒星的光波在高度 h 上被湍流层所扰动, 对应到镜面上接收到的一定距离的两点光的强度起伏特性, 即望远镜所观测到的闪烁星像, 包含了该层湍流的信息。下列公式给出闪烁图像的自相关函数^[55],

$$C^{**}(r) = \int_0^{\infty} dh C_n^2(h) \{ aC(r, H) + b[C(r - \rho H, H) + C(r + \rho H, H)] \}, \quad (4)$$

其中 $C_n^2(h)$ 为湍流廓线函数, $C(r, H)$ 是 H 高度的恒星闪烁自相关函数, H 为对应的湍流层高度, r 是自相关函数中心峰值的位置, ρ 是双星分离角, 因子 a, b 分别如下, $a = \frac{1 + \alpha^2}{(1 + \alpha)^2}$,

$$b = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2}, \quad \alpha = 10^{-0.4\Delta m}, \quad \Delta m \text{ 为双星星等差。}$$

从闪烁图像中解析出大气折射率结构常数 $C_n^2(h)$ 和相应高度的风速 $v(h)$ 廓线中, 可以计算出相应湍流层高度的光学湍流参数: 视宁度、相干长度 r_0 、相关时间 τ_0 和等晕角 θ_0 等。

图 4 展示的观测结果由安装在 CTIO 的 Cerro Tololo 台址 1.5 m 望远镜上的 G-SCIDAR

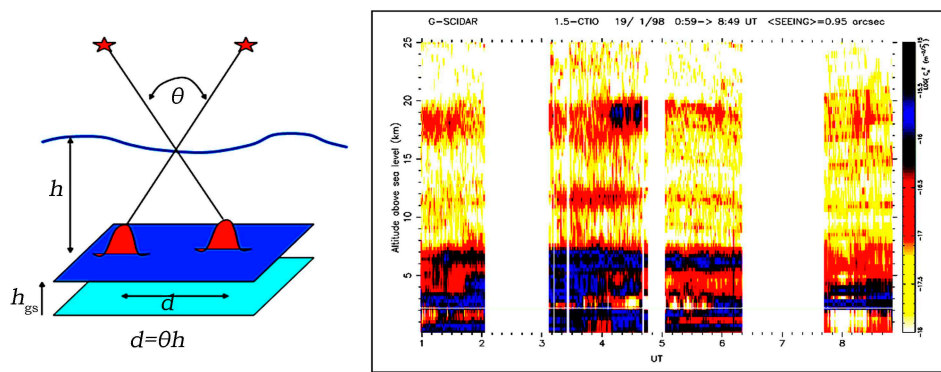


图 4 G-SCIDAR 原理和在 Cerro Tololo 台址 1998 年 1 月 19 日观测结果^[55]

获得^[55]。可以看出，G-SCIDAR 给出了地面到离地面 25 km 范围内的大气湍流廓线，其中近地面湍流活动最强烈。

SCIDAR 技术目前已经在世界大型光学红外望远镜选址中得到广泛应用，最引人注目的欧洲南方天文台 ELT 选址计划^[56]、美国的 TMT 选址计划和南极的 DOME C 选址计划^[57]，都将 SCIDAR 列入其必备的选址设备，监测周期都在 1 年以上。在已有的世界优良台址，如美国夏威夷岛的 Mauna Kea 台址^[58]、欧洲南方天文台在北智利的 Paranal 台址^[59]以及西班牙加纳利群岛的 La Palma 台址^[60]等，也都普遍应用 SCIDAR 技术，为其自适应光学系统提供高分辨率的湍流分布信息。

3.4 Micro-Thermometry

微温脉动法是通过测量大气中有一定距离的两点之间的温度微小脉动，来获取光学湍流的分布^[61]。该方法的主要依据是 Kolmogorov 的局部均匀各向同性湍流理论，即在大气中两点之间的距离小于大气湍流的惯性区时 ($l_0 \ll r \ll L_0$)，大气湍流与温度强度和频率的细微变化相关，其温度结构函数满足公式^[62]：

$$C_T^2(r) = \{[T(x) - T(x+r)]^2\} \times r^{-2/3}, \quad (5)$$

其中 $C_T^2(r)$ 为温度结构常数， T 为温度， r 是两点之间的距离。在光学波段，折射率结构常数和温度结构常数的关系可表示为：

$$C_n^2(h) = \left(\frac{7.86 \times 10^{-5} \times P(h)}{T^2(h)} \right)^2 C_T^2(h), \quad (6)$$

其中 P, T 分别是空间测量点的气压 (单位为 hpa) 和绝对温度 (单位为 K)。根据上面的公式 (5)、(6)，通过快速测量大气中两点的温度差值、气压和平均温度，可以得出折射率结构常数。

微温传感器是微温脉动仪的重要组成部分，微温传感器采用金属丝材料，一般选用铂丝或者镍丝，具有响应速度快、线性度好、分辨率高、体积小等特点，但同时由于微温丝较细，容易损坏。图 5 是国家天文台西部选址项目在西藏物玛和新疆卡拉苏监测点的微温脉动仪电路框图，采用电桥差分方式探测两点温差，可以提高探测精度。

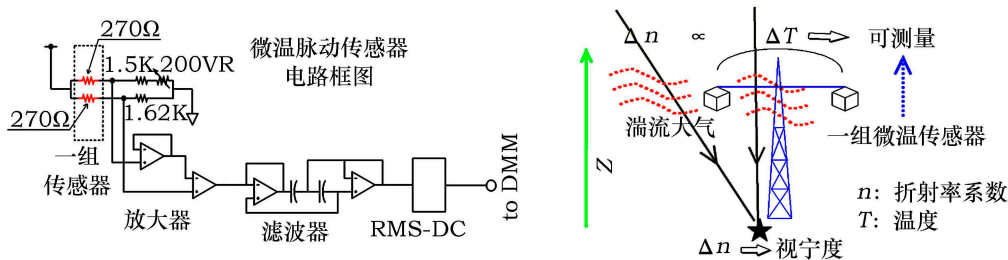


图 5 微温脉动仪原理 (右) 与电路图 (左)

微温脉动法有两种应用形式。一种是将微温传感器装载在探空气球上，来测量从地面到高空对流层顶的整个光学湍流的分布。该方法可以获取高分辨率的垂直光学湍流和风速

廓线^[63]。另一种是将微温传感器固定在地面上几十米高度的 1 个高塔上, 从而测量近地面光学湍流^[64]。图 5 是近地面探测湍流的原理示意图, 一对微温传感器在距离为 r 的范围内, 大气的温度变化和折射率变化是一致的, 通过测量大气温度快速脉动, 可以求出温度结构常数、近地面湍流分层信息, 进而获得近地面层湍流的特征高度和视宁度等信息。近地面湍流的形成与活动经常与局部地形密切相关, 在整个大气光学湍流中占有最大的比重, 对天文观测的影响不可忽视。

图 6 是国家天文台西部天文选址项目在新疆卡拉苏点获取的近地面微温探测结果。分别给出了微温传感器分布在 4.15 m、6.25 m、10.15 m、19.15 m、36.65 m 共 5 层高度上的温度结构常数。明显看出, 离地面最近的 4.15 m 高度的湍流层活动最强, 白天的近地面层湍流活动比夜间要强。

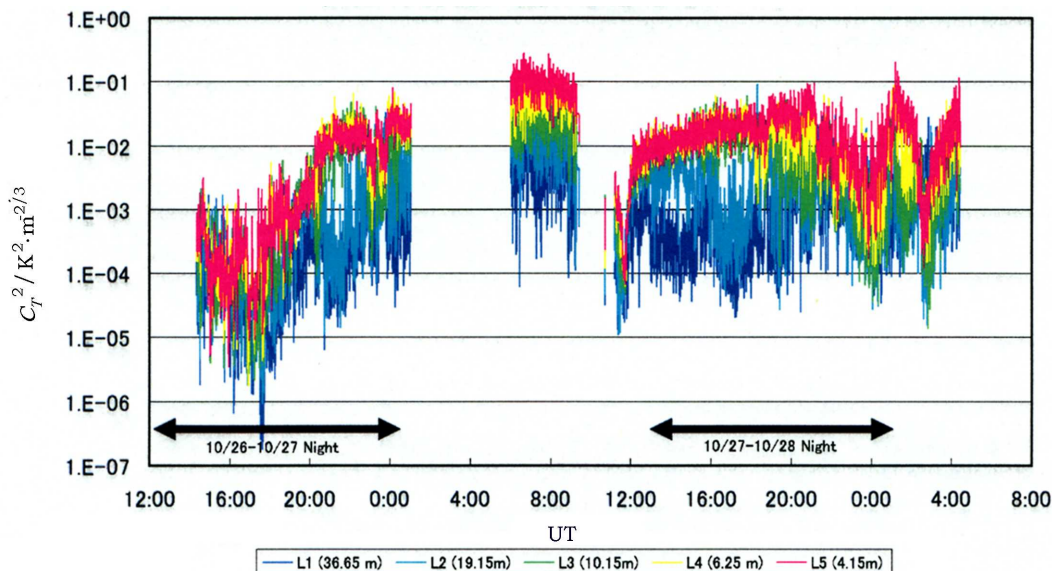


图 6 新疆卡拉苏点 2007 年 10 月 26 至 28 日进行的近地面微温探测结果

4 国内现状和展望

1980 年以前, 国内早期选址工作由于没有较完善的设备进行观测, 多采用目视法和目视衍射环法进行大气光学湍流的定性评估; 台址评价基本上依靠选址专家的人工经验来完成。尽管该时期的光学湍流测量精度较低, 但经过老一辈天文学家的艰苦努力, 仍为我国天文界选定了如兴隆观测站等一大批优良的台址^[65]。

20 世纪 80 年代以来, 随着 CCD 探测器技术的应用, 国内的光学湍流探测水平有了很大提高, 并应用于已有台站的光学湍流评价和新的选址工作中。1978 年到 1979 年, 云南天文台在宾川县和凤凰山进行了为期 1 年的拖影和北极星拖影观测及处理, 对当地的视宁度条件进行评价^[66]。上海天文台为了研究佘山站大气视宁度的基本情况, 1986 年 10 月到 1987 年 4

月,利用 40 cm 折射望远镜照相拖影法测量大气相干长度,利用龙华气象站的高空气象数据计算并分析了 $C_n^2(h)$ 及大气光学参数的季节变化特征,首次对佘山站的大气光学湍流活动进行了综合评价^[67]。兴隆观测站在 1994 年分别采用 DIMM、星像全半宽法、温度脉动探空仪和声雷达等四种测量方法对大气光学湍流进行观测实验。其中声雷达为北京大学研制,温度脉动探空仪和 DIMM 为安徽光机所提供^[68],星像全半宽法利用兴隆观测站的 2.16 m 望远镜观测完成。此次观测获得了大气折射率结构常数廓线以及整层大气相干长度,尽管观测时间较短,但是对兴隆观测站的光学湍流活动有了较全面的评价^[69,70]。

20 世纪 90 年代的云南选址中,应用了 DIMM^[71]、微温^[62]、声雷达^[72]等方法来测量大气光学湍流特性。早在 1993 年,云南天文台就率先研制了 DIMM 设备进行视宁度观测^[73,74],而微温脉动仪为安徽光机所研制。这是我国第三次选址高潮,最终为云南天文台选定了丽江高美古台址^[75,76],极大地推动了 2.4 m 望远镜的立项建设。云南天文台还为红外太阳塔开展了抚仙湖老鹰地的选址工作,采用太阳差分像运动监测仪和闪烁仪等昼间视宁度监测设备进行观测,并给出白天大气光学湍流活动评价^[77,78]。

2000 年前后,紫金山天文台在盱眙跑马山为 120 cm 近地天体望远镜进行选址,给出了选址点的夜天光亮度和大气视宁度及气象要素的观测结果^[79],其中大气视宁度测量设备为云南天文台提供的三孔 DIMM。BATC 利用兴隆观测站施密特望远镜在 1995—2001 年对北极星的大量观测数据,采用提取星像全半宽的方法对视宁度进行了统计,发现随季节和天气条件的不同,视宁度多数分布在 2"~5" 之间,兴隆视宁度条件夏季比冬季好。该项研究成为兴隆视宁度的重要参考,对了解视宁度的季节变化有重要意义^[80]。

2003 年,国家天文台启动西部选址项目^[81],采用自己研制的 DIMM 设备和与日本国立天文台共同研制的微温脉动仪分别对新疆的卡拉苏和西藏的物玛监测点进行了大气光学湍流探测^[50]。从 CTIO 处获得 DIMM-MASS 设备,正在进行实验性观测。目前正与法国 NICE 大学合作,开始单星 SCIDAR 的研制工作。多项大气光学湍流探测设备将被投入到新的选址工作中,由于西部野外台址的科研条件相当艰苦,需要发展高度自动化的大气湍流观测设备。

2006 年,南极 Dome-A 天文选址计划启动^[82,83],通过国际合作,已经安装了微温、声雷达等近地面湍流探测设备,进行常年监测。但缺乏 MASS、SCIDAR 等整层大气光学湍流廓线设备,急需细致的湍流廓线探测结果。

2010 年启动的 SONG 项目选址,已经在德令哈观测站安装北极星拖影视宁度仪开始进行长期监测,并与 DIMM 设备进行比对试验。即将启动的 4 m 太阳光学望远镜选址,对昼间大气光学湍流探测提出了新的要求。

综上所述,经过近 30 年的积累,中国天文界已经成功地应用 DIMM 对各个台站进行过整层大气湍流积分值的测量,也进行过声雷达、近地面微温探测及放球探测等较为短期的实验。随着西部天文选址、南极 Dome-A 选址,以及日渐普及的自适应光学技术应用的需要,大气湍流廓线的细致探测将成为天文选址的迫切需求和重点发展方向。根据不同选址的要求特点,亟须进行大气湍流廓线的反演算法研究及其相应的设备研制。对于尚未建站的候选台址,要求便携的小型化、自动化湍流廓线监测设备来提供台址评价;而已有台站的发展重点是高分辨率的湍流廓线探测技术,为自适应光学后端提供所需参数。展望今后几年,为满足台址

评价和天文选址的需求, 我国将逐步发展应用 DIMM-MASS、单星 SCIDAR 等新型光学湍流观测设备, 大气光学湍流探测技术将有长足的发展。

参考文献:

- [1] 吴 健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论, 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 5
- [2] Abahamid A, Jabiri A, Vernin J, et al. *A&A*, 2004, 416: 1193
- [3] 张逸新, 随机介质中光的传播与成像, 北京: 国防工业出版社, 2002: 325
- [4] Masciadri E, Avila R, and Sánchez L. *A&A*, 2002, 382: 378
- [5] Avila R. *ASP Conf. Ser.*, 2002, 266: 63
- [6] Vernin J. *ASP Conf. Ser.*, 2002, 266: 2
- [7] Lloyd J P. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5491: 190
- [8] 饶瑞中, 光在湍流大气中的传播, 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 58
- [9] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. *力学与实践*, 2002, 24: 1
- [10] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓, 湍流理论与模拟, 北京: 清华大学出版社, 2005: 1
- [11] 侯金良. *天文学进展*, 1997, 15: 83
- [12] Avila R, Vernin J. *Cambridge Contemporary Astrophysics*, 1999
- [13] 侯金良. *天文学进展*, 1994, 12: 126
- [14] Sarazin M. *ASP Conf. Ser.*, 2002, 266: 342
- [15] Tokovinin A, Vernin J, Ziad A, et al. *The astronomical society of the Pacific*, 2005, 117: 395
- [16] Graham E, Sarazin M, Beniston M, et al. *Proc. SPIE*, 2004, 5489: 102
- [17] Munoz T C, Vernin J, Sarazin M. *Proc. SPIE*, 2004, 5382: 607
- [18] Ellerbroek B L. *JOSAA*, 1994, 11: 783
- [19] 吴晓庆. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 29: 104
- [20] Preble A J, Wissler J B, Scruggs T B, et al. *Proc. SPIE*, 1994, 2266: 536
- [21] Fried D L. *J. OPT. Soc. Am.*, 1965, 55: 1427
- [22] Fried D L. *J. OPT. Soc. Am.*, 1966, 56: 1380
- [23] Davis J, Tango W. *PASP*, 1996, 108: 456
- [24] Loos G C, Hogge C B. *Appl Opt*, 1979, 18: 2654
- [25] 吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳, 等. *强激光与粒子束*, 2002, 14: 233
- [26] 翁宁泉, 曾宗泳, 马成胜, 等. *量子电子学报*, 1998, 15: 423
- [27] Voitsekhovich V V, Cuevas S. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, 12: 2523
- [28] 沈 峰, 姜文汉. *光学学报*, 2001, 21: 290
- [29] Ragazzoni R. *Journal of modern optics*, 1996, 43: 289
- [30] Miracle S, Yzuel M J, Millan S, et al. *Phys. Med. Biol.*, 1979, 24: 372
- [31] Mcimaes B, Walter M F. *PASP*, 1974, 86: 529
- [32] Vernin J, Roddier F J. *Opt. Soc. Am*, 1973, 63: 270
- [33] Schneiderman A M, Karo D P. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, 68: 348
- [34] Sarazin M, Roddier F. *A&A*, 1990, 227: 294
- [35] Kornilov V, Tokovinin A, Shatsky N, et al. *MNRAS*, 2007, 382: 1268
- [36] Marks R D, Vernin J, Azouit M, et al. *A&AS*, 1996, 118: 385
- [37] Avila R, Vernin J, Masciadri E. *Appl.Opt.*, 1997, 36: 7898
- [38] Ziad A, Martin F, Conan R, et al. *Proc. SPIE*, 1999, 3866: 156
- [39] Moore A, Aristidi E, Ashley M, et al. *Proc. SPIE*, 2006, 6269: 62695U
- [40] Love G D, Dunlop C N, Patrick S, et al. *Proc. SPIE*, 2006, 6018: 60180G

- [41] Colin S B, Michael C B, Jon S L, et al. Proc. SPIE, 2008, 7014: 70146I
- [42] Hickson P, Lanzetta K. PASP, 2004, 116: 826
- [43] Habib A, Vernin J. MNRAS, 2006, 368: 1456
- [44] Forbes F F, Morse D A, Poczulp G A. Opt. Eng., 1988, 27: 845
- [45] Fumihiko U, Naruhisa T, Akihiko M, et al. Proc. SPIE, 2006, 6267: 62670N
- [46] 郭锐, 杨磊, 翟东升等. 天文研究与技术, 2008, 5: 398
- [47] Wang L, Schöck M, Chanan G, et al. Appl. Opt., 2007, 46: 6460
- [48] Vernin J, Muñoz-Tuñón C, Sarazin M. Proc. SPIE, 2008, 7012: 70121T
- [49] Aristidi E, Agabi A, Fossat E. A&A, 2005, 444: 651
- [50] Yao Y Q, Wang J C, Liu L Y, et al. APRIM meeting, 2008: 379
- [51] Tokovinin A, Kornilov V. MNRAS, 2007, 381: 1179
- [52] Kornilov V, Tokovinin A, Shatsky N, et al. MNRAS, 2007, 382: 1268
- [53] Vernin J, Roddier F. Journal of the Optical Society of America, 1973, 63: 270
- [54] Fuchs A. PASP, 1998, 110: 86
- [55] Avila R, Vernin J, Sdanchez L J. A&A, 2001, 369: 364
- [56] Casiana M, Marc Sarazin M, Vernin J. Site selection for the European ELT, ESO report, 2006
- [57] Vernin J, Chadida M, Aristidia E, et al. Proceedings of IAU, 2006: 695
- [58] Tokovinin A, Vernin J, Ziad A, et al. PASP, 2005, 117: 395
- [59] Ramió H V, Delgado J M, Reyes M, et al. Proc. SPIE, 2008, 7012: 701245
- [60] Wilson R W, Wooder N J, Rigal F, et al. MNRAS, 2003, 339: 491
- [61] Lynds C R. IAUS, 1964, 19: 126
- [62] 侯金良, 苏洪钧. 云南天文台台刊, 1996, s1: 119
- [63] Azouit M, Vernin J. PASP, 2005, 117: 536
- [64] Marks R D, Vernin J, Azouit M, et al. A&AS, 1996, 118: 385
- [65] 北京天文台筹备处恒星物理研究室. 科学通报, 1965, 12: 1102
- [66] 黄寅亮, 茶光伟, 刘新德, 等. 云南天文台台刊, 1981, 1: 158
- [67] 侯金良, 中国科学院上海天文台台刊, 1989, 10: 66
- [68] 宋正方, 杨高潮, 刘晓春, 等. 量子电子学报, 1997, 14: 68
- [69] Song Z, Zeng Z, Yang G. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15: 93
- [70] Wu X, Zeng Z, Ma C, et al. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1996, 13: 385
- [71] 岑学奋, 许骏, 钱铜铃, 等. 云南天文台台刊, 1996(增刊): 73
- [72] 郝象梁. 云南天文台台刊, 1996(增刊): 117
- [73] 刘忠, 仇朴章, 邱耀辉, 等. 云南天文台台刊, 1993, 4: 22
- [74] 岑学奋, 钱铜铃, 许骏, 等. 云南天文台台刊, 1996(增刊): 64
- [75] 于建明, 刘子忠, 栾蒂, 等. 云南天文台台刊, 1996(增刊): 48
- [76] 钱铜铃, 李玉兰, 尚琼珍, 等. 云南天文台台刊, 1996(增刊): 57
- [77] 张柏荣, 吴铭蟾. 云南天文台台刊, 1996(增刊): 38
- [78] 楼柯, 刘忠, 张瑞龙, 等. 天文学进展, 2001, 19: 147
- [79] 姚进生, 吴月珍, 王闵, 等. 天文学进展, 2001, 19: 174
- [80] Liu Y, Zhou X, Sun W, et al. PASP, 2003, 115: 495
- [81] Yao Y. J. Korean Astron. Soc., 2005, 38: 113
- [82] Zhou X, Wu Z Y, Jiang Z J, et al. RAA, 2010, 10: 279
- [83] Lawrence J S, Ashley M C, Burton M G, et al. Proc. SPIE, 2006, 6267: 62671L

Detection Technology of Atmospheric Optical Turbulence for Astronomical Site

LIU Li-yong^{1,2,3}, YAO Yong-qiang^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is known that the effects of optical turbulence are important to astronomical observation. Therefore, a brief review about the latest detection technology of atmospheric optical turbulence is given here.

In this paper, the parameters of atmospheric turbulence are introduced, such as optical turbulence profile, coherence length, coherence time, isoplanatism angle and outer scale, those are important to adaptive optics observations.

A summarization is given to the principles and observation of DIMM, MASS, SCIDAR and Micro-Thermometry. DIMM is a portable instrument for detection of optical turbulence, but it only senses the whole atmosphere. MASS can subdivide the whole atmosphere into 6 thick layers, e.g. 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 km, and the turbulence intensity in each layer is measured. Turbulence of the ground layer can be measured by combining MASS and DIMM. The SCIDAR technique provides the profile of the optical turbulence and the velocity of the turbulent layers, the single star SCIDAR is a portable version of the SCIDARs, it can be installed on small telescopes. The refractive index variations arise directly from temperature fluctuations and can be measured by using the temperature fluctuations. Microthermal sensors are equipped to mast or balloons, the former only detect the near-ground turbulence, and the latter can get the profile of the whole atmosphere turbulence and wind.

Finally, we summarize the development of detection technology of atmospheric optical turbulence in China.

Key words: site testing; seeing; optical turbulence profile