

大气湍流外尺度对大口径望远镜成像分辨率的影响

饶瑞中*

中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 回顾了湍流大气中光学成像分辨率研究的发展历程:Fried得到了Kolmogorov大气湍流中成像分辨率的理论公式,提出了一个光学工程中广泛应用的Fried参量 r_0 ;研究发现当成像系统的口径大于 r_0 时,其成像分辨本领由 r_0 决定;多位学者探讨了大气湍流外尺度对成像分辨率的影响,发现当外尺度与成像系统口径相仿甚至更小时,大气湍流的影响会大大减弱。因此大气湍流外尺度的定量获取至关重要。但由于大气湍流外尺度的定义是定性的,它与大气参数以及各种光传播效应参量之间没有清晰的联系,各种方法得到的结果的一致性有待深入分析,需要一个定量的定义,并进行系统的测量研究。

关键词 大气光学; 大气湍流; 光学成像; 分辨本领; 湍流外尺度

中图分类号 O439; P183.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231259

1 引言

大气湍流对天文观测(望远镜成像)的影响很早就被人们所知晓。16世纪的英国科学家牛顿在其《光学》一书中对大气湍流引起的星光闪烁现象进行了细致的分析。他发现用长望远镜观测比用短望远镜观测时,物体看起来更亮一些、更大一些,但却不能消除大气颤动引起的光线的混乱,即使用大口径望远镜观测可以提高图像的亮度,但不能提高图像的分辨率。牛顿认为原理上无法克服大气湍流的影响,只有摆脱大气才能解决这个问题,“唯一的救药是非常宁静的空气,这在云端之上的高山之巅可能存在”^[1],这一直是现代天文观测站址选择的指导思想。

苏联学者Tatarskii^[2]使用苏联数学家Kolmogorov的湍流统计理论描述大气湍流的光学特性,建立了随机介质光传播的经典理论,解决了弱起伏条件下大气湍流对光传播的影响。在此理论基础上,美国学者Fried^[3]研究了大气湍流中的光学成像分辨本领问题,提出了一个描述大气湍流影响程度的大气相干长度 r_0 ,这个参数现在已成为光学工程应用中的一个基本参数,人们称之为Fried参数。一个口径为 D 的理想光学成像系统在波长 λ 处的分辨率约为 λ/D ,在湍流大气中,如果 $D < r_0$,则成像分辨率仍由 D 决定。但当 $D > r_0$ 时,成像分辨率由 r_0 决定,约为 λ/r_0 ;在这种情况下,增大 D 无助于提高成像分辨率,仅提高图像的亮

度。湍流大气中的成像理论被无数的科学实验所证实,为广大的光学工程人士所熟知,已成为现代统计光学教科书的内容^[4]。

现代专业的天文观测望远镜的口径大都在米级以上,而大气条件很好的天文台址的 r_0 一般在0.1 m左右^[5],因此大气湍流对天文成像分辨率的影响是显著的。为解决大气湍流对成像质量的影响,自适应光学相位校正技术被提出。得益于此项技术,大气湍流的影响在不很严重时可以得到很好的改善^[6]。但相位校正效率随湍流强度的增大而降低,当湍流影响十分严重时,这项技术也很难发挥作用^[7]。为彻底摆脱大气湍流的影响,哈勃太空望远镜、韦伯太空望远镜相继发射,成功地获得了地面上不曾得到过的清晰度空前的天文图像。机载的平流层红外天文台(SOFIA)也避开了近地稠密的对流层大气进行天文观测。尽管如此,更大口径(30~50 m)的地面天文望远镜(美国TMT,欧洲E-ELT)依然在建造或规划中^[8-9]。涉及更大尺度范围的甚长基线干涉仪和合成孔径阵列望远镜的天文观测系统也获得了具有影响深远的天文图像^[10]。更大口径的望远镜又回到地面,原因何在呢?

Kolmogorov湍流,即局地均匀、各向同性湍流存在一个惯性子区,其范围由湍流的内尺度和外尺度所界定。基于当时的认识,Fried的分析假定湍流外尺度远大于成像系统的口径。随着对湍流外尺度研究和观测的不断深入,人们发现大气湍流外尺度的数值越来

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-08-21; 录用日期: 2023-08-29; 网络首发日期: 2023-09-22

通信作者: *rao@aiofm.cas.cn

越小于早期的预计, 仅是 1 m 或 10 m 的量级。这样 Fried 的结论还成立吗?

早在 1973 年, 意大利学者 Consortini 等^[11]探索了有限湍流外尺度对湍流大气中光学成像分辨率的影响, 认为当距离大于湍流外尺度的两点的波结构函数值小于 20 时, 大气湍流对成像分辨率没有影响。这项重要的工作并未引起重视。1990 年法国天文学家 Borgnino 针对甚长基线干涉术和大口径天文成像问题进行研究, 并考虑了湍流外尺度对成像的影响。在这类问题中, 基线长度或望远镜口径已经和外尺度相仿甚至更大, 在穿越整层大气的成像问题中, 不同高度的湍流强度和外尺度都不均匀, 为此 Borgnino^[12]提出了一个空域相干外尺度的概念, 空域相干外尺度相当于对各种高度上的外尺度用湍流强度加权平均的值。

1991 年英国物理学者 McKechnie^[13-14]根据天文学界零星报道的红外大口径天文望远镜观测到的一些分辨率很高的图像, 提出了一种新鲜的观点, 认为整层大气湍流可视为由两个参数描述的相位屏, 两个参数为调制传递函数和光谱相关函数。根据这种新思路, McKechnie^[15]认为只要大口径望远镜本身的质量足以得到衍射受限的图像, 在大气中进行天文观测时就可以得到接近于衍射受限的图像。他于 1992 年进一步针对成像分辨率进行了讨论, 认为实际大气湍流的外尺度很小(小于米级), 而望远镜的口径远大于外尺度, 足以消除大气湍流的影响, 成像分辨率主要还是由望远镜口径决定; 在这种情况下, 无论是天文成像还是激光传输都不需要自适应光学相位校正。McKechnie 关于湍流介质光传播的新观点及其对天文图像的解释的论文得到的关注耐人寻味。随机介质光传播经典理论的奠基人 Tatarskii 和 Zavorotny^[16]很快就对其文章进行了评述, 认为 McKechnie 引用的那些天文图像可以使用经典理论来分析并得到合理解释, 而 McKechnie 得出湍流外尺度仅 35 cm 的结果完全不符合实际观测或光传播实验。McKechnie^[17]则对上述评论予以反对。除了 Gurvich 和 Belen'kii 明确不同意 McKechnie 的观点之外^[18], 再也无人对 McKechnie 的观点予以批

驳或支持, 虽然偶尔有文献引用, 但仅作为湍流对图像影响的工作; 他本人也未有进一步的工作发表。然而, 在 2016 年他撰写出版了一部《大气光传播和成像的一般理论》专著, 全面阐述异于经典随机介质光传播理论的系统理论体系, 2022 年出版了此专著第二版^[19-20]。

1997 年俄罗斯学者 Chesnokov 和 Skipetrov^[21]用包含湍流外尺度的 von Karman 湍流谱模型得到的波结构函数取代纯粹的幂指数形式, 按照 Fried 的研究思路分析了湍流大气中成像分辨本领。2012 年俄罗斯大气光学所的学者 Lukin^[22]以 L_0/r_0 (相位起伏方差的 3/5 次方, 其中 L_0 为湍流外尺度) 为参量利用随机介质光传播经典理论对湍流外尺度对光学成像分辨率的影响进行细致分析。这些结果也可以解释 McKechnie 提出的问题。另一方面, 在随机介质光传播经典理论的框架内, 由于光传播过程的随机性, 获得质量很好的图像的概率是存在的^[23-24]。不同于 McKechnie, Lukin 一直从事湍流介质光传播、自适应光学相位校正等工作, 在大气光学领域具有重要影响力。然而他针对这个问题的研究成果也没有引起足够的关注。

2 随机介质光传播经典理论中湍流外尺度对成像分辨率的影响

2.1 不考虑湍流外尺度的成像分辨本领

Fried 定义一个口径为 D 的透镜的分辨本领 R 为其光学传递函数的积分值^[3]。长曝光下的分辨本领以 R_∞ 表示, 以无穷大口径的透镜的分辨本领定义一个极限值 $R_{\max} = \lim_{D \rightarrow \infty} R_\infty$, 实际上这个极限值也是在湍流外尺度 $L_0 \rightarrow \infty$ 的条件下获得的, 即 $R_{\max} = \lim_{\substack{D \rightarrow \infty \\ L_0 \rightarrow \infty}} R_\infty$ 。

R_{\max} 用来对任意口径透镜的分辨本领进行归一化。归一化的分辨本领是以 Fried 参数归一化的口径 D/r_0 的函数。长曝光和短曝光下的分辨本领不同; 短曝光分为近场 ($D \gg \sqrt{\lambda L}$) 和远场 ($D \ll \sqrt{\lambda L}$) 成像两种情况, L 为传播距离。长曝光和短曝光下归一化的透镜分辨本领分别为

$$\begin{cases} \frac{R_\infty}{R_{\max}} = \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u du \left[\arccos u - u(1-u^2)^{1/2} \right] \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} \right] \\ \frac{R_0^{\text{nf}}}{R_{\max}} = \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u du \left[\arccos u - u(1-u^2)^{1/2} \right] \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} (1-u^{1/2}) \right] \\ \frac{R_0^{\text{ff}}}{R_{\max}} = \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u du \left[\arccos u - u(1-u^2)^{1/2} \right] \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} \left(1 - \frac{1}{2} u^{1/2} \right) \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: 上标 nf 代表近场; 上标 ff 代表远场。

光学系统长曝光和短曝光成像分辨本领在不考虑

湍流外尺度情况下随参数 D/r_0 的变化情况如图 1 所示。

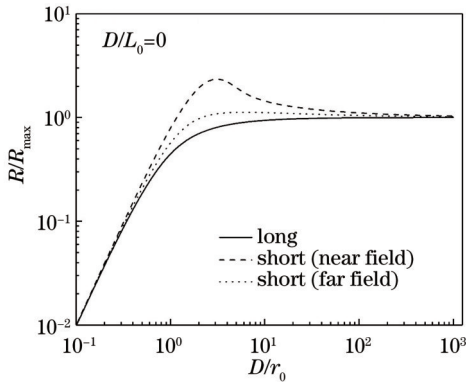
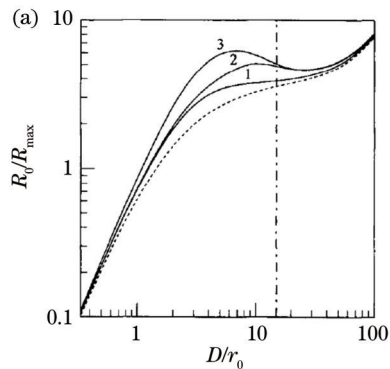


图 1 无穷大湍流外尺度下的成像分辨本领

Fig. 1 Imaging resolution power under infinite turbulence outer scale

2.2 有限湍流外尺度的成像分辨本领

Consortini 等^[11]分析了湍流外尺度对成像分辨率的影响,认为在远大于外尺度的距离上波结构函数的饱和值 D_w 具有和 Fried 参数同样的重要性。对于一般



传播路径,该值可表示为

$$D_w(r \gg L_0) = 1.56k^2 \int_{L_0}^{z} C_n^2(z) dz, \quad (2)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$; C_n^2 为折射率结构常数。对于均匀路径传播距离为 L 的情况,则有

$$A = D_w(r \gg L_0) = 1.56k^2 C_n^2 L L_0^{5/3}. \quad (3)$$

如果 A 小于 20,则光学系统的成像分辨本领明显偏离 Fried 的结果, A 值(L_0 值)越小,湍流的影响越弱。Lukin^[22]注意到,在远大于外尺度的距离上相位结构函数是单点相位起伏方差的两倍,他在相似的情况下得到了同样的结论。

Chesnokov 和 Skipetrov 详细分析了光学系统长曝光和短曝光成像分辨本领在不同湍流外尺度情况下随参数 D/r_0 的变化情况^[21],其结果如图 2 所示。短曝光对应于 $L_0/r_0 = 15$ 的情况:曲线 1、2、3 分别对应菲涅耳尺度远大于 D (远场)、 $2r_0$ 以及远小于 D (近场);点线为长曝光结果。长曝光中曲线 1、2、3、4 分别对应于 L_0/r_0 为 ∞ 、20、15 和 10。可以看出这些结果与图 1 明显的差别在于:在有限湍流外尺度下,随着参数 D/r_0 的增大,成像分辨本领不再趋于一个恒定的极限值,而是随 D/r_0 的增大而增大。

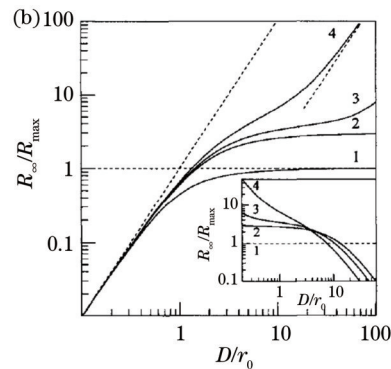


图 2 有限湍流外尺度下的成像分辨本领。(a)短曝光;(b)长曝光

Fig. 2 Imaging resolution power under finite turbulence outer scales. (a) Short exposure; (b) long exposure

2.3 波结构函数形式对有限湍流外尺度下成像分辨本领的影响

Tatarskii^[2]给出了湍流外尺度的定义:最大的非各向同性的尺度。空间尺度大于湍流外尺度的湍流结构与具体的条件密切相关,既不具有各向同性,也不具有一般性,因此不适合用结构函数来描述其统计平均特征。但为了定量地分析它们对光传播的影响,通常还是将适用于湍流惯性子区的结构函数推广到大于湍流外尺度的范围。在这种情况下, $r > L_0$ 的结构函数以及从惯性子区过渡到 $r > L_0$ 的结构函数,存在着不同的形式。它们在惯性子区趋于一致,但在惯性子区之外有明显的差异,很难说哪一种更可靠,只有在描述具体湍流时和实验结果更接近的才是合适的。一般认为,在大于外尺度的距离上湍流场不相关,结构函数趋于常数,只取决于起伏方差。

von Karman 考虑外尺度情况下得到的径向风速起伏的结构函数^[2]为

$$D_n(r) = \frac{2}{3} \bar{v}^2 \left[1 - \frac{2^{2/3}}{\Gamma(1/3)} (r/L_0)^{1/3} K_{1/3}(r/L_0) \right], \quad (4)$$

式中: \bar{v}^2 是速度起伏的平方平均; $\Gamma(1/3)$ 为伽马函数; $K_{1/3}$ 为虚自变量的第二类 Bessel 函数。同样可以获得考虑外尺度情况下的被动保守量(温度、折射率)的结构函数。Tatarskii 还引入了湍流折射率起伏的积分尺度 L_n ,它具有和外尺度 L_0 相同的量级,在传播条件满足 $\sqrt{L\lambda} \gg L_0$ 时,光场振幅起伏和相位起伏的相关距离 L_A 、 L_S 就等同于湍流外尺度 L_0 、积分尺度 L_n 。依据随机介质光传播理论可以得到考虑外尺度情况下的波结构函数。

Fried 推导湍流大气中的成像分辨率时,用到的波结构函数采用以下形式^[3]:

$$D(r) = 6.88(r/r_0)^{5/3}. \quad (5)$$

这对应于外尺度为无穷大的 Kolmogorov 湍流谱, 对于有限外尺度的湍流谱, 使用最多的是 von Karman 谱, Lutomirski 和 Yura^[25] 的波结构函数采用以下形式:

$$D(\rho) = 2.91k^2 C_n^2 \rho^{5/3} \left[1 - 0.8(\rho/L_0)^{1/3} \right], \quad (6)$$

式中: ρ 为两点间的距离。

Chesnokov 采用的波结构函数的形式^[21]为

$$D(\rho) = C_1(k_0 r_0)^{-5/3} \left[1 - C_2(k_0 \rho)^{5/6} K_{5/6}(k_0 \rho) \right], \quad (7)$$

式中: $k_0 = 2\pi/L_0$ 。Lukin 采用的波结构函数的形式^[22]为

$$D(r) \approx 2(L_0/\rho_0)^{5/3} \left\{ 1 - \exp\left[-(r/L_0)^{5/3}\right] \right\}. \quad (8)$$

Locke 和 Young^[26] 仔细分析了平面波和球面波结构函数在有限外尺度下的波结构函数理论解析表达式

的差异。

而 Sasiela^[27] 在 Fried 结构函数表达式的基础上增加一个修正因子 $F(y)$, 其形式如下:

$$D(r) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3} F(y), \quad (9)$$

其中

$$F(y) = 0.895 \left[\frac{\Gamma(5/6) y^{-5/3} - 2^{1/6} y^{-5/6} K_{5/6}(y)}{2\Gamma(11/6)} \right], \quad (10)$$

式中: $y = 2\pi r/L_0$ 。

在考虑湍流外尺度的情况下, 可以采用 Fried 成像分辨本领的表述方式, 在以 r_0 归一化 L_0 的参数下, 分辨本领表达为归一化口径 D/r_0 的函数。只不过不宜再称为“归一化”的分辨本领, 因为不同外尺度下极限分辨本领 R_{\max} 可能不同。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{R_{\infty}}{R_{\max}} &= \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u du \left[\arccos u - u(1-u^2)^{1/2} \right] \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} F(u) \right] \\ \frac{R_0^{\text{nf}}}{R_{\max}} &= \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u du \left[\arccos u - u(1-u^2)^{1/2} \right] \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} (1-u^{1/2}) F(u) \right] \\ \frac{R_0^{\text{ff}}}{R_{\max}} &= \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u du \left[\arccos u - u(1-u^2)^{1/2} \right] \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} \left(1 - \frac{1}{2} u^{1/2} \right) F(u) \right] \end{aligned} \right. , \quad (11)$$

式中: 修正因子 $F(u)$ 通过变量代换 $y = \frac{2\pi D}{r_0} \frac{r}{L_0} \frac{r}{D} = 2\pi u \left(\frac{D}{r_0} \right) / \left(\frac{L_0}{r_0} \right)$ 采用式(10)计算。

根据 Seisala 结构函数表达式分析了光学系统长曝光和短曝光成像分辨本领在不同湍流外尺度情况下随参数 D/r_0 的变化情况, 典型的结果如图 3 所示。图 3(a) 和 3(b) 分别对应于 $L_0/r_0=20$ 和 $L_0/r_0=10$ 。

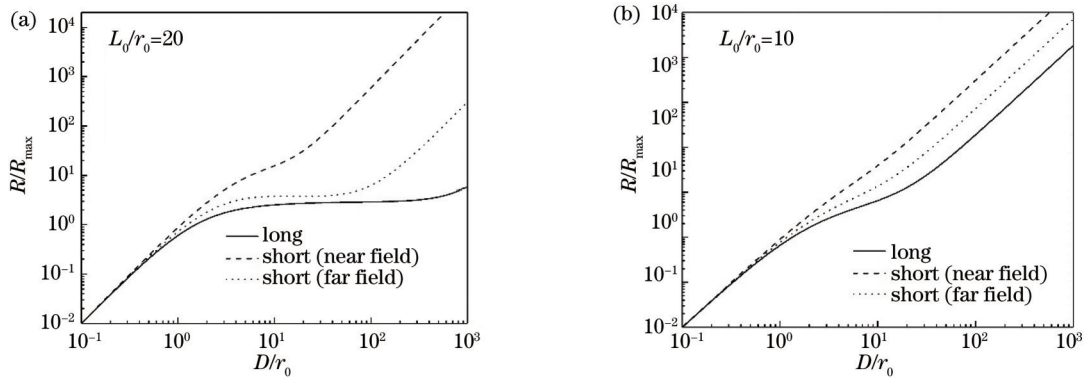


图 3 有限湍流外尺度下的成像分辨本领。(a) $L_0/r_0=20$; (b) $L_0/r_0=10$

Fig. 3 Imaging resolution power under finite turbulence outer scales. (a) $L_0/r_0=20$; (b) $L_0/r_0=10$

虽然学者们提出了一系列结构函数的表达式可供理论分析使用, 但实际的具体测量结果是重要的。Bester 等^[28] 根据 $11 \mu\text{m}$ 波长的双望远镜空间干涉仪的恒星观测以及地面激光距离干涉仪的路径长度起伏观

测, 发现结构函数与理论模型有显著的差别, 他们认为大口径望远镜或长基线干涉术获得的红外图像要优于理论预期。

3 大气湍流影响大口径望远镜成像的 McKechnie 观点

McKechnie 根据一些天文观测报道和与个别天文学者的交流中得到的信息,认为许多天文图像与经典随机介质光传播理论预测的结果不符。例如 Griffin^[29]观察到的星体图像具有明亮的核,图像质量的不良主要来自光学系统本身的像差因素;Christou 等^[30]对短曝光图像运用移动叠加(shift-and-add,实际效果类似于消除相位倾斜)方法可以得到近似衍射极限的优良光斑图像。这些图像有两个明显的特点:1)图像具有“亮核”;2)图像没有抖动。McKechnie 认为造成这种现象的原因在于湍流外尺度并没有一般认为的那样大。他特别提到用 4~10 m 的望远镜得到的近红外波段的观测图像可以具有 0.03"~0.1" 的分辨率,尽管在可见光波段的视宁度仅有 1"。要得到这么高分辨率的图像,望远镜本身的质量须接近衍射极限的水平,而目前的许多望远镜的质量达不到;很小的湍流外尺度也将导致大气实际等晕角远大于目前认可的等晕角,因此,在大口径望远镜成像时是不需要进行相位补偿的。

McKechnie^[13-14]的理论假定大口径望远镜成像的特性不取决于光场的复振幅而仅与光谱相关函数以及大气湍流介质的 MTF 有关,而后者仅与相位起伏特性有关。McKechnie 在其理论中使用一个量——波高 H 表示光场相位的起伏,并假定 H 服从正态分布。将 H 乘以波数 k 即可转化为相位,进行此变量代换后,McKechnie 的相位结构函数可转化为

$$D_s(r) \approx 2\sigma_s^2 \left\{ 1 - \exp \left[- (r/\Lambda_0)^2 \right] \right\}, \quad (12)$$

式中: $\sigma_s = k\sigma_H$ 为相位起伏均方根。比较此式与上述各种结构函数,它与式(8)的形式接近,只是随间距的变化趋势不同,如果该式中的 Λ_0 为湍流外尺度,则在大于外尺度上的间距上,二者相同。

根据 McKechnie 的理论,望远镜分辨率取决于相位起伏的大小。当相位起伏均方根值 $\sigma_s > 0.6\pi$ 时,分辨率由相位起伏均方根值和湍流外尺度共同决定,为 $(4\sigma_H/\Lambda_0)$;而当相位起伏均方根值 $\sigma_s < 0.6\pi$ 时,分辨率由望远镜的口径决定,为 λ/D 。

Tatarskii 和 Zavorotny^[16]对 McKechnie 的文章进行了细致的评述,他们认为 McKechnie 的出发点在于把图像中心的亮斑作为图像质量很好(接近衍射极限)的证据。根据随机介质光传播的经典理论,他们认为:在湍流很强(r_0 很小)时,湍流介质中的图像为随机变化的散斑,明亮斑点的数量约为 $(D/r_0)^2$,每个亮斑具有望远镜衍射极限的尺度;而当 D/r_0 数量较小时(对应于红外长波观测),只有几个明亮的光斑,而它们的亮度随机变化,总有一个最亮的斑点,这就是 McKechnie 认定的“亮核”。但 McKechnie 并不同意这种解释,他

认为随机散斑与相位倾斜无关,而“亮核”位置比图像重心更准确地反映相位的倾斜^[17]。Tatarskii 和 Zavorotny 认为相位起伏方差应该很大,但 McKechnie 得到的相位起伏方差很小。在这一点上,McKechnie 也不认同。

McKechnie 推导得出的另一个非同寻常的结果是:存在一个最佳波长,在该波长处可以得到最优的成像质量。他将此结果推广到激光大气传输中的应用,对于像自由电子激光这样波长可以调谐的光源,在应用时可以根据大气湍流的条件选择最佳的发射波长。这个结果也是与随机介质光传播经典理论不符的。因为湍流条件下的极限成像分辨率约为 λ/r_0 ,考虑到 r_0 的波长依赖关系,则任意波长处的成像分辨率与波长的 1/5 次方成反比,即波长越长越好,不存在一个最优波长。实际上,工作在稠密对流层大气之上的平流层红外天文台 SOFIA 的 2.5 m 望远镜的分辨率也仅在几个角秒的量级,在 0.6 μm 的成像分辨率为 1.5",在其他波长上的分辨率为 0.1λ ($\lambda > 15 \mu\text{m}$),达不到 McKechnie 以为的零点几个角秒的分辨率^[31]。

Gurvich 和 Belen'kii^[18]将平流层湍流和对流层湍流分开处理,前者的功率谱幂律为 3,且非各向同性,其研究结果认为平流层湍流对短曝光图像的质量没有影响,但对长曝光图像的质量有明显影响,由于两层湍流对相位倾斜项影响的波长依赖关系是相同的,则经相位倾斜项校正后的图像质量的改善效果将明显大于 Fried 经典理论的预期。基于这种分析,他们认为 McKechnie 将两层湍流统一处理并赋予极小的外尺度的做法不妥,而 Tatarskii 的批评是中肯的。

无论 McKechnie 观点的可靠性如何,他提出的湍流外尺度或大结构特征尺度对成像分辨率的影响的问题是值得关注的,尽管流行的大气湍流中成像理论并没有理会他的工作^[32-33]。在早期的光学工程中,光学系统通光口径的尺度一般要小于湍流外尺度。经典的随机介质光传播理论都是建立在湍流惯性子区统计特征的基础上,湍流特征尺度(内尺度或外尺度)的影响已有所显现,但未引起足够的重视^[34-35]。虽然折射率结构常数 C_n^2 已广泛应用于描述大气湍流的强度,但一般情况下光学湍流的结构函数依赖于起伏方差 σ_n^2 和以湍流外尺度衡量的距离。对于普遍的非 Kolmogorov 大气湍流,全面准确地描述湍流特性需要使用折射率起伏方差、功率谱幂指数和湍流外尺度三个独立的参量。无量纲的折射率起伏方差 σ_n^2 ,不受任何其他因素影响、不依赖于理论假设,它才是真正的大气光学湍流强度,将它与功率谱幂指数和湍流外尺度联合起来,就可以全面描述光传播的大气湍流效应。此描述方法在随机介质光传播理论和实验研究中并没有得到广泛采用,实验上可能源于测量技术的缺乏,而理论上则可能是传统的惯性作用。

当前光学工程技术飞速发展,大型地基天文望远

镜的通光口径已达几十米,接近或超过了典型的大气湍流外尺度,而长基线干涉技术和合成孔径成像技术更是将等效通光口径提高到 10^3 m 量级甚至 10^6 m 量级(地球)的尺度,在这种形势下,大气湍流的特征尺度带来的影响必须加以充分考虑。

4 定量的大气湍流外尺度

大气湍流特征尺度(内尺度、外尺度)实际上是定性的概念,并没有严格且定量的定义。形象地说,湍流外尺度对应于能量注入的大尺度湍流涡旋,它与流体的具体环境有密切的关系而没有普适的性质,这就决定了它自身的某种不确定性。

在实际光电工程应用中,必须利用大气湍流特征尺度的定量数据,如在一些湍流廓线模式的研究中,其物理基础就是利用了湍流强度与外尺度的定量关系。在图像分辨率的研究工作中同样面临这个问题。早期基于定性认识,普遍认为大气湍流外尺度与海拔高度 h 有关并且呈单调递增关系,如 $h/2$ 、 \sqrt{h} 、 $h/10$ 等。随着研究的深入开展,研究者逐步发现情况复杂,大气湍流外尺度不但远小于早期预期值,而且还不是随高度单调增加。

定量的外尺度测量工作一般基于光传播效应,这些效应都与湍流的功率谱或结构函数有关。湍流特征尺度处对应的结构函数或功率谱都处于两种不同变化规律的转折处。当考虑大尺度湍流起伏时,理论研究者大都使用 von Karman 谱模型及其变型^[36],通过对获得的功率谱和结构函数的拟合获得外尺度的值^[37]。根据光传播效应得到的湍流外尺度的值都是建立在

Kolmogorov 湍流理论基础之上的,即惯性子区的功率谱满足 $-5/3$ 幂律。

基于不同湍流谱模型或光传播效应的湍流外尺度测量方法得到的结果显然是有差异的。由于外尺度 L_0 的重要性尚未得到充分认识,在光电工程应用中, L_0 没有像 Fried 参数 r_0 、折射率结构常数 C_n^2 那样成为必须了解的关键参数,因此,迄今为止,并没有一种统一的测量标准和标准测量技术。

长期的实验测量结果表明,大气湍流功率谱在很多情况下不满足 $-5/3$ 幂律。Bufton^[38] 利用气球搭载温度脉动仪测量了高达 25 km 的湍流廓线,并与星光闪烁进行对比研究,认为高层大气湍流具有破碎波运动(breaking wave motion)特征,功率谱幂律不同于充分发展的湍流,有限的湍流竖直结构也使得外尺度较小。美国 ABLEACE (airborne laser extended atmospheric characterization experiment) 研究项目利用飞机在高空对大气温度进行了长距离的大量测量,利用测量数据分析得到的功率谱幂指数也是一个随空间位置的变化而变化的值,大部分情况下偏离了 $-5/3$ ^[39]。这说明实际大气湍流的情况是很复杂的,当利用局地各向同性湍流统计理论进行光传播问题的分析时,可以获得定性的和一定程度定量的结果,但准确的分析依赖于对大气湍流光学性质的深入了解。

Coulman 等^[40]的工作表明湍流外尺度并非单调地随高度增大,而是在对流层顶附近存在一个峰值,并且在所用高度上都只有米的量级,观测到的最大外尺度值仅为 5 m 左右。在欧洲和南美智利安第斯山上的欧洲南方天文台两地测量的结果如图 4 所示。

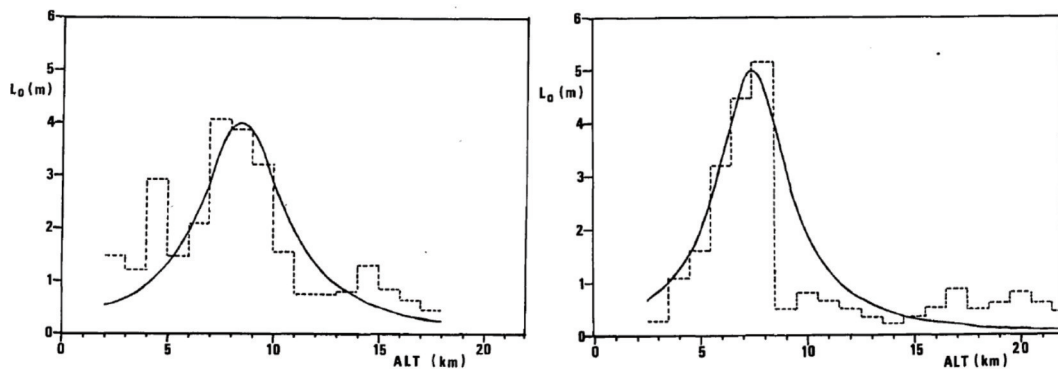


图 4 湍流外尺度的高度廓线分布^[40]

Fig. 4 Height profile distribution of turbulence outer scale^[40]

Tatarskii 和 Zavorotny^[16]认为这些测量获得的外尺度很小,其原因在于探空测量数据分析不恰当地使用了 Tatarskii^[2]的相似理论公式,根据测量的大气湍流强度和大气温度等参数的梯度计算湍流外尺度,该公式如下:

$$C_n^2 = \alpha M^2 L_0^{4/3}, \quad (13)$$

式中: α 为一常数(约等于 2.8); M 为折射率梯度。该

公式只适用于近地面边界层,但在所有高度上的探空测量数据处理都采用了此公式。值得注意的是,现阶段有很多的大气湍流廓线建模和预报工作都是在这个公式的基础上采用一定的外尺度廓线模式而得到湍流强度的。

Beland 和 Brown 以及 Roadcap 和 Morgenstern^[41-42]的工作都得到了平流层湍流外尺度值小于米级的结

果,如图 5 左图所示。Ziad 等^[43-44]使用 GSM、DIMM 等几种整层大气湍流测量技术分析获得了外尺度的高度分布特征,并与探空原位测量结果进行了比较,认为原

位测量值相对要小,其主要原因在于湍流外尺度定义不同。一种典型的结果如图 5 右图所示。

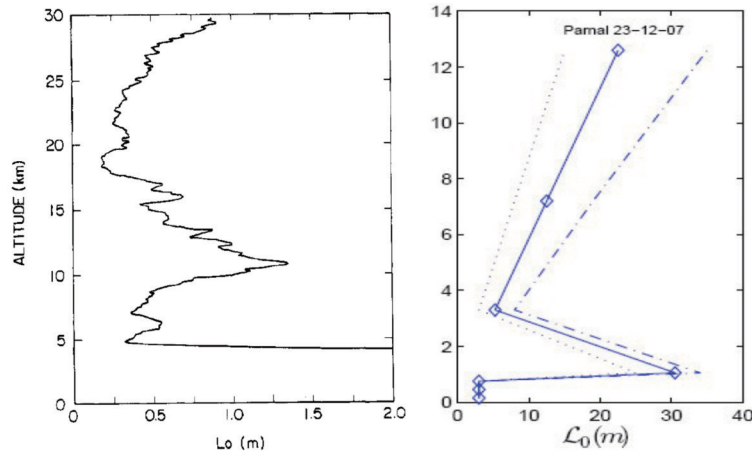


图 5 湍流外尺度的高度廓线分布^[41, 44]

Fig. 5 Height profile distributions of turbulence outer scale^[41, 44]

Buscher 等^[45]在大气条件很好的天文台站址的观测结果显示,根据湍流谱拟合得到的外尺度数值具有较大的不确定性,大致位于 10~100 m 的范围内。Eaton 和 Nastrom^[46]测得的大气湍流外尺度的廓线分布显示:5 km 高度的外尺度值约为 60 m,随高度的增加而减小,最小值在 15 km 附近,为 12~20 m;而后外尺度值又随高度的增加而增大,如图 6 所示。这与前述结果有很大的差别。

度的定义测量得到的,而是在 Tatarskii 公式的基础上利用 C_n^2 和大气参数梯度计算得到的。因此可以说,迄今为止,并没有真正的外尺度原位直接测量结果。直接测量应该针对大气折射率(或温度)的结构函数或相关函数进行,这种直接测量虽然在近地面已有初步的尝试^[48],但有待深入探索,研发专用仪器,并应用于探空测量。

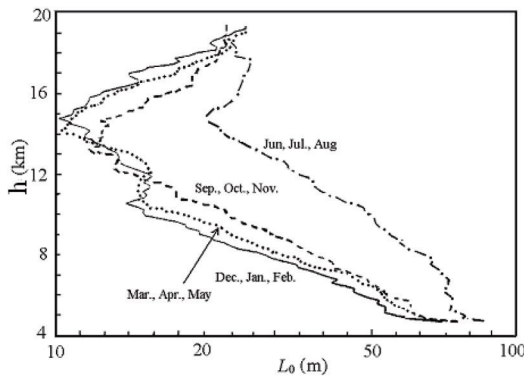


图 6 湍流外尺度的高度分布及其季节变化特征^[46]

Fig. 6 Height distribution of turbulence outer scale and its seasonal characteristics^[46]

Lukin^[47]根据以上这些研究结果总结出了几种综合性的模型,目前在相关领域得到使用。从以上几种典型的外尺度高度分布廓线可以看出,它们之间无论是在数值大小上还是在分布特征上都有显著区别,这说明有关大气湍流外尺度的工作存在一些问题需要进一步澄清,包括外尺度的定量定义、测量原理和方法,以及是否存在具有普遍意义的高度分布特征等。

对于穿过整层大气的光传播(包括成像)问题,分析大气湍流的影响时必须考虑折射率结构常数和特征尺度的廓线分布特征。迄今为止的大多数相关分析研究没有考虑特征尺度的影响,少数分析工作虽然考虑了,但为了简化问题,把特征长度作为一个不随路径变化的恒定值。如果已知特征尺度的高度分布,如何得到一个等效的平均值呢?或者说从整层大气光传播效应得到的等效特征尺度和具体的路径分布值有什么关系呢?

Borgnino^[12]根据考虑外尺度情况下光波的到达角起伏方差,提出了一个等效外尺度:

$$L_0^{-1/3} = \left[\int_0^\infty L_0(h)^{-1/3} C_n^2(h) dh \right] / \left[\int_0^\infty C_n^2(h) dh \right] \quad (14)$$

上述结果建立在 Roddier^[49]得到的到达角起伏方差的计算式:

$$\sigma_m^2 \propto \int_0^\infty C_n^2(h) dh \int_{1/L_0}^{1/D} f^{-2/3} df, \quad (15)$$

式中: f 为空间频率。式(15)中湍流谱积分限实际上假定了湍流外尺度大于望远镜口径 D 。按照这种处理方法,认为当 $L_0 < D$ 时湍流对口径内的到达角起伏不再有影响。显然,这种以到达角起伏方差为目的的外尺度等效处理方法有明显的局限性。

使用光传播效应获得的外尺度值既是间接的,也是某种平均值,而探空的原位测量值,也不是按照外尺

Lukin^[37]则根据 von Karman 湍流谱和结构函数提出了另一个等效外尺度计算式:

$$L_0^* = \left\{ \left[\int_0^\infty L_0(h)^{5/3} C_n^2(h) dh \right] \left/ \left[\int_0^\infty C_n^2(h) dh \right] \right. \right\}^{3/5} \quad (16)$$

Dewan 和 Grossbard^[50] 基于 10 m 高度分辨率的探空测量结果,认为平流层湍流层的厚度比预期的值要小,只有 10% 左右的大气分层厚度里存在湍流,因此按照一个大气分层厚度加权高度积分后对应的平均外尺度值,必然导致其结果远小于真实的外尺度值。合适的计算方法应该是:

$$\langle L_0^{4/3} \rangle = F_T (\overline{L_0})^{4/3}, \quad (17)$$

式中: F_T 为湍流层厚度占大气分层厚度的比例。

5 小结与讨论

本文简要回顾了湍流大气中大口径望远镜成像分辨率研究的发展历程,重点讨论了湍流外尺度对分辨率的影响和外尺度本身涉及的问题,主要结论如下。

1) 大气湍流外尺度对光学系统成像分辨率的影响已是不争的事实,在经典随机介质光传播理论的基础上,可以获得成像分辨本领与外尺度的定量关系。然而,不同的波结构函数导致不同的定量关系,哪一种精度和可靠度更高,需要定量的实验测量研究。随着大口径望远镜、甚长基线干涉成像和合成孔径成像等技术的发展与应用,这个问题需要尽早解决^[51]。此外,除了湍流外尺度的影响,湍流内尺度也对成像分辨率也有一定的影响^[52]。

2) 虽然大气湍流外尺度对成像分辨率的影响可以在经典随机介质光传播理论的基础上定量地解决,但 McKechnie 提出的问题 and 解决问题的思路应给予重视,能否从中提取有益的思路或启发值得考虑。经典随机介质光传播解析理论运用的研究思路和方法已经很完善,但仅适用于弱起伏条件,一般非弱起伏条件的传播问题只能借助于数值模拟和实验研究。或许可以另辟蹊径,探索出一条新的解析方法。

3) 大气湍流外尺度概念及其测量方法和技术需要深化研究。大气湍流外尺度及其廓线分布的定量测量与建模工作已经开展了很长时间,积累了大量数据,建立了不少模式。但 Tartarskii 模式需要的外尺度,基于 von Karman 湍流谱(和结构函数模型)确定的外尺度,以及通过直接测量结构函数得到的外尺度,这三种之间的区别和联系,需要进一步深入研究。这个问题的厘清,不仅对成像分辨率,而且对大气湍流强度廓线的建模,以及各种光传播效应的研究及其工程应用都非常重要。

4) 鉴于实际大气湍流十分复杂,能够满足局地均匀、各向同性的情况是不多的,因此运用 Kolmogorov 理论统计分析获得的大气湍流特征及其在光传播、成像等光电工程中应用的定量结果在一定意义上都是某

种等效结果,获得的定量结果的精度和可靠性需要根据具体情况而确定。由于大气湍流谱的幂律偏离 Kolmogorov 湍流谱幂律以及各个高度上大气湍流的分层特征及其导致的水平和垂直方向上显著的差别,要唯一、定量地定义一个湍流外尺度可能是做不到的。无论采用哪种已经使用过的外尺度概念,我们应当谨慎地只把相关分析结果作为参考,最终依赖实际光电工程的工作效果评价大气湍流的影响。

参 考 文 献

- [1] Newton I. Optics. In great books of the western world[M]. Hutchins R M, ed. Chicago: Encyclopedia, 1952.
- [2] Tatarskii V I. Wave propagation in a turbulent medium[M]. New York: McGraw-Hall, 1961.
- [3] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [4] Goodman J W. Statistical optics[M]. New York: Wiley, 1985.
- [5] Walters D L, Bradford L W. Measurements of r_0 and θ_0 : two decades and 18 sites[J]. Applied Optics, 1997, 36(30): 7876-7886.
- [6] Roddier F. Adaptive optics in astronomy[M]. New York: Cambridge University Press, 1999.
- [7] Wang J Y. Optical resolution through a turbulent medium with adaptive phase compensations[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(3): 383-390.
- [8] Schöck M, Els S, Riddle R, et al. Thirty meter telescope site testing I: overview[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2009, 121(878): 384-395.
- [9] Vermin J, Muñoz-Tuñón C, Sarazin M, et al. European extremely large telescope site characterization I: overview[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2011, 123(909): 1334-1346.
- [10] The Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 event horizon telescope results[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2019, 875: L1-L6.
- [11] Consortini A, Ronchi L, Moroder E. Role of the outer scale of turbulence in atmospheric degradation of optical images[J]. Journal of the Optical Society of America, 1973, 63(10): 1246-1248.
- [12] Borgnino J. Estimation of the spatial coherence outer scale relevant to long baseline interferometry and imaging in optical astronomy[J]. Applied Optics, 1990, 29(13): 1863-1865.
- [13] McKechnie T S. Light propagation through the atmosphere and the properties of images formed by large ground-based telescopes [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(2): 346-365.
- [14] McKechnie T S. Propagation of the spectral correlation function in a homogeneous medium[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(2): 339-345.
- [15] McKechnie T S. Atmospheric turbulence and the resolution limits of large ground-based telescopes[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(11): 1937-1954.
- [16] Tatarskii V I, Zavorotny V U. Atmospheric turbulence and the resolution limits of large ground-based telescopes: comment[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(11): 2410-2414.
- [17] McKechnie T S. Atmospheric turbulence and the resolution limits of large ground-based telescopes: reply to comment[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(11): 2415-2417.
- [18] Gurvich A S, Belen'kii M S. Influence of stratospheric

- turbulence on infrared imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(11): 2517-2522.
- [19] McKechnie T S. General theory of light propagation and imaging through the atmosphere[M]. Cham: Springer, 2016.
- [20] McKechnie T S. General theory of light propagation and imaging through the atmosphere[M]. Cham: Springer, 2022.
- [21] Chesnokov S S, Skipetrov S E. Optical resolution through atmospheric turbulence with finite outer scale[J]. *Optics Communications*, 1997, 141(3/4): 113-117.
- [22] Lukin I P. Quality of optical imaging and the outer scale of atmospheric turbulence[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(10): 101711.
- [23] Fried D L. Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, 68(12): 1651-1958.
- [24] Bensimon D, Englander A, Karoubi R, et al. Measurement of the probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(9): 1138-1139.
- [25] Lutomirski R F, Yura H T. Wave structure function and mutual coherence function of an optical wave in a turbulent atmosphere [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(4): 482-487.
- [26] Lucke R L, Young C Y. Theoretical wave structure function when the effect of the outer scale is significant[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(4): 559-569.
- [27] Sasiela R J. Electromagnetic wave propagation in turbulence[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2007.
- [28] Bester M, Danchi W C, Degiacomi C G, et al. Atmospheric fluctuations-empirical structure functions and projected performance of future instruments[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1992, 392: 357-374.
- [29] Griffin R F. On image structure, and the value and challenge of very large telescopes[J]. *Observatory*, 1973, 93: 3-8.
- [30] Christou J C, Hege E K, Freeman J D, et al. Self-calibrating shift-and-add technique for speckle imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(2): 204-209.
- [31] Becklin E E. Stratospheric observatory for infrared astronomy (SOFIA)[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(6): 1087-1090.
- [32] Berana M J, Oz-Vogt J. Imaging through turbulence in the atmosphere[M]//*Progress in Optics*. Amsterdam: Elsevier, 1994: 319-388.
- [33] Roggemann M C, Welsh B M. Imaging through turbulence[M]. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- [34] Rao R Z, Wang S P, Liu X C, et al. Turbulence spectrum effect on wave temporal-frequency spectra for light propagating through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(11): 2755-2762.
- [35] Rao R Z. Optical properties of atmospheric turbulence and their effects on light propagation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5832: 1-11.
- [36] Voitsekhovich V V. Outer scale of turbulence: comparison of different models[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(6): 1346-1353.
- [37] Lukin V P. Estimation of behavior of outer scale turbulence from optical measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4538: 74-84.
- [38] Bufton J L. Comparison of vertical profile turbulence structure with stellar observations[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(8): 1785-1793.
- [39] Papanicolaou G, Sølna K, Washburn D. Segmentation-independent estimates of turbulence parameters[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3381: 256-267.
- [40] Coulman C E, Vermin J, Coqueugnot Y, et al. Outer scale of turbulence appropriate to modeling refractive-index structure profiles[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(1): 155-160.
- [41] Beland R R, Brown J H. A deterministic temperature model for stratospheric optical turbulence[J]. *Physica Scripta*, 1988, 37(3): 419-423.
- [42] Roadcap J R, Morgenstern C D. Comparison of observed and modeled isoplanatic angles using synoptic weather data[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2375: 41-50.
- [43] Ziad A, Schöck M, Chanan G A, et al. Comparison of measurements of the outer scale of turbulence by three different techniques[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(11): 2316-2324.
- [44] Ziad A. Review of the outer scale of the atmospheric turbulence [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9909: 99091K.
- [45] Buscher D F, Armstrong J T, Hummel C A, et al. Interferometric seeing measurements on Mt Wilson: power spectra and outer scales[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(6): 1081-1096.
- [46] Eaton F D, Nastrom G D. Preliminary estimates of the vertical profiles of inner and outer scales from White Sands Missile Range, New Mexico, VHF radar observations[J]. *Radio Science*, 1998, 33(4): 895-903.
- [47] Lukin V P. Out scale of atmospheric turbulence[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5981: 1-13.
- [48] 王倩, 梅海平, 钱仙妹, 等. 近地面大气光学湍流外尺度的实验研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 224216.
Wang Q, Mei H P, Qian X M, et al. Experimental investigation of the outer scale in atmospheric optical turbulence near the ground[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224216.
- [49] Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J]. *Progress in Optics*, 1981, 19: 281-376.
- [50] Dewan E M, Grossbard N. The inertial range "outer scale" and optical turbulence[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2007, 7(5): 383-396.
- [51] 张洪建, 韦宏艳, 贾锐, 等. 斜程大气湍流中成像系统分辨率的影响因素研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1569-1573.
Zhang H J, Wei H Y, Jia R, et al. Effects factors of imaging system resolution in slant atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1569-1573.
- [52] 张逸新, 孙寅. 湍流尺度对大气成像系统分辨率的影响[J]. *中国激光*, 2000, 27(7): 655-659.
Zhang Y X, Sun Y. Effects of the scale of turbulence on optical resolution of imaging system in turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(7): 655-659.

Effect of Outer Scale of Atmospheric Turbulence on Imaging Resolution of Large Telescopes

Rao Ruizhong*

Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract

Significance The effects of atmospheric turbulence on astronomical observation (optical imaging) have long been recognized. Newton proposed that the observatory should be built on the top of a high mountain to reduce the turbulence effects. In modern time Fried investigated this problem based on the Kolmogorov turbulence model and obtained analytical formulae for resolution power. The Fried parameter r_0 has been widely applied to optical engineering. If r_0 is less than the lens diameter D , the resolution power will be determined by r_0 rather than D . A typical r_0 for a good observatory site is about 0.1 m and much less than the astronomical lens diameter, and the adaptive optics (AO) has to be employed to compensate turbulence-induced phase fluctuations. However, as the AO compensation efficiency degrades with turbulence and under strong turbulence AO can not work properly, large space telescopes such as Hubble and James Webb were launched into space to avoid Earth's turbulence. Meanwhile, some investigations reveal that the outer scale L_0 affects the resolution power. If L_0 is about or even less than the lens diameter D , the turbulence effect on imaging resolution power should be greatly reduced. As increasingly larger astronomical telescopes and optical engineering lenses are planned or being built, the effect of outer scale on imaging resolution power will play an essential role in the design and performance of the optical engineering system. Thus, it is necessary to clarify the outer scale properties of practical atmosphere turbulence and its effect on the imaging resolution power of large telescopes.

Progress The research history about the effect of atmospheric turbulence on optical imaging resolution was reviewed. Based on Fried's study, some investigators studied the role of turbulence outer scale in imaging resolution power. In 1973 Consortini *et al.* first investigated the problem and proposed that if the value of the wave structure function over the outer scale is less than 20, the turbulence does not put a limit to the resolution of an optical system. In 1990 Borgnino explored the problem mainly for long baseline interferometry and imaging in optical astronomy. In such cases, the baseline length or the telescope aperture diameter is comparable with the turbulence outer scale, and in imaging through the whole atmosphere, the turbulence strength and the outer scale vary with height. Therefore, Borgnino proposed an equivalent outer scale defined as an averaged outer scale weighted by the turbulence strength at different heights.

In 1991 McKechnie proposed a fresh point of view on how atmospheric turbulence affects images formed by large ground-based telescopes. This means the atmosphere can be represented by an equivalent phase screen for the two quantities that determine most of the important image properties, including the atmospheric modulation transfer function and the spectral correlation function. In 1992 McKechnie investigated the imaging resolution by large telescopes and concluded that the outer scale of atmospheric turbulence is practically small and less than 1 m. Since the telescope aperture is much greater than the turbulence outer scale, the effects of turbulence on imaging can be eliminated, and thus in this case the adaptive optics is unnecessary for both astronomical imaging and laser propagation.

Tatarskii and Zavorotny criticized McKechnie's viewpoint and believed that star images presented by McKechnie could well be explained with the classical propagation theory and the traditional turbulent model. However, the McKechnie model of scattering, a single-scale atmosphere with an outer scale of 35 cm, contradicts all our experience with turbulence. This comment was supported by Gurvich and Belen'kii. In 1997, Chesnokov and Skipetrov analyzed the imaging resolution ability in turbulent atmosphere. In 2012, Lukin also investigated quantitatively the effect of outer scale on the imaging resolution of large telescopes. These results could be applied to explain McKechnie's image problem. However, McKechnie insisted on his viewpoint and developed his theory in the book *General Theory of Light Propagation and Imaging through the Atmosphere* with the first and second editions published in 2016 and 2022 respectively.

On the other hand, our understanding of the turbulence outer scale has deepened quickly. Increasingly more practical measurements at different locations reveal that the outer scale is not as large as early thought and its characteristics are very complicated. Some models for height distribution of the outer scale were proposed for theoretical use, but *in-situ* measurements are still needed for practical applications.

Conclusions and Prospects It is well recognized that the turbulence outer scale exerts significant influence on the imaging resolution power of large telescopes, and quantitative relationships can be established based on the classical theory

of light propagation through turbulence. However, some different turbulence spectrum models that can be adopted for theoretical research on different relationships between the imaging resolution and the turbulence outer scale may be obtained. Practical measurements for the outer scale and experimental studies are necessary for building a reliable relationship.

As the turbulence outer scale can only be defined qualitatively, a quantitative definition should be built to investigate its properties with systematic measurements by employing related measurement techniques based on different principles. This kind of work is critical not only for imaging applications but also for other applications such as atmospheric turbulence profiling.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; optical imaging; resolution power; turbulence outer scale