

实际大气中激光闪烁的频谱特征

饶瑞中 王世鹏 刘晓春 龚知本

(中国科学院安徽光机所大气光学研究室 合肥 230031)

提要 以 5 线段拟合法建立了确定湍流大气中激光对数光强起伏频谱的无标度区间的方法。根据无标度区间的标度指数与起伏强度的关系发现: 频谱特征在冬季和夏季明显不同, 标度指数在大部分情况下与局地均匀各向同性湍流介质中的光传播理论结果存在较大差别。

关键词 光传播, 大气湍流, 光强起伏, 频谱分析。

1 引 言

激光在湍流大气中的光强起伏一直是波在随机介质中传播研究的一个重要问题。光强起伏的功率谱特征在一定程度上反映了湍流介质折射率场起伏的统计特性。研究表明^[1]: 对数光强的功率谱可以分为低频段和高频段两个区间。在低频段的主要部分, 功率谱呈常数; 而在高频段的大部分范围, 功率谱与频率呈指数变化关系, 满足标度不变律, 在本文中我们称之为无标度区间。

由于实验数据远比理论结果复杂, 直接拟合求无标度区间的标度指数是困难的, 但如果系统地研究无标度区间的标度指数的变化规律, 则必须按照一个客观的统一判断标准确定标度指数值。为此我们建立了一种 5 线段拟合法以准确确定功率谱的无标度区间, 并应用于实验数据分析。实验中, 传输距离为 500 m, 光源是波长为 0.6328 μm 的基模 He-Ne 激光; 采样频率为 1300 Hz。每次实验持续进行 24 h, 每次采集 135168 个样本点, 相邻两次采集相隔 10 min, 闪烁指数跨越了近两个量级, 涵盖了弱起伏条件的主要范围。

2 湍流结构函数与闪烁功率谱

根据 Kolmogorov 的湍流统计理论^[2], 在充分发展的局地各向同性湍流场中存在着一个惯性区, 在此区间内, 湍流速度场的结构函数呈现标度律

$$D_v(r) = C_v^2 r^\zeta \quad (1)$$

标度指数 ζ 按 Kolmogorov 的量纲分析方法所得为 2/3。Obuhov 按照类似的假设认为作为保守被动混合物的湍流温度场的结构函数具有相同的标度律^[2]

$$D_T(r) = C_T^2 r^\zeta \quad (2)$$

对于主要由温度场决定的折射率场的结构函数, 也应具有相同的标度律^[3]

$$D_n(r) = C_n^2 r^\zeta \tag{3}$$

对应的一维空间谱为

$$V_n(\kappa) \propto \kappa^{-(\zeta+1)} \tag{4}$$

对应的三维空间谱为

$$\Phi_n(\kappa) \propto \kappa^{-(\zeta+3)} \tag{5}$$

在弱起伏条件下, 湍流介质中传播的波长为 λ 的平面波振幅的二维谱密度为^[3]

$$F_A(\kappa, 0) \propto \left[1 - \frac{\lambda^2 \kappa}{4\pi^2 L} \sin \frac{4\pi^2 L}{\lambda^2 \kappa} \right] \kappa^{-(\zeta+3)} \tag{6}$$

据此可求得波的振幅的相关函数, 其 Fourier 变换即为波振幅的起伏频谱。经过一系列的数学推导并作一些物理假设, 即可求得对数光强的功率谱。在频率很高时功率谱满足标度律

$$W_{\ln I}(f) \propto f^{\alpha_0} \quad \alpha_0 = -(\zeta+2) \tag{7}$$

这里标度指数 α_0 应为 $-8/3$ 。根据实验数据求得的标度指数 α 与理论值 α_0 的差别, 可以对局地均匀各向同性湍流的假设作一大致的判断。

3 功率谱无标度区间的确定

从实验数据的直接分析可知功率谱的实际分布比理论预期的复杂。在频率最低的地方、低频段和高频段的交界处以及高频段的上沿的功率谱都与常数区间或无标度区间的谱分布明显不同。我们可以将功率谱 $W(f)$ 的对数和频率 f 的对数的关系表示为 5 条直线段的组合

$$\ln W(f) = a_i + b_i \ln f \quad (\ln f_{i-1} \leq \ln f \leq \ln f_i) \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \tag{8}$$

式中 f_0 为非零最低频率值, f_1, f_2, f_3, f_4 为相邻两段相交处的频率值, f_5 为最高频率值。采用分段拟合的方法求得系数。

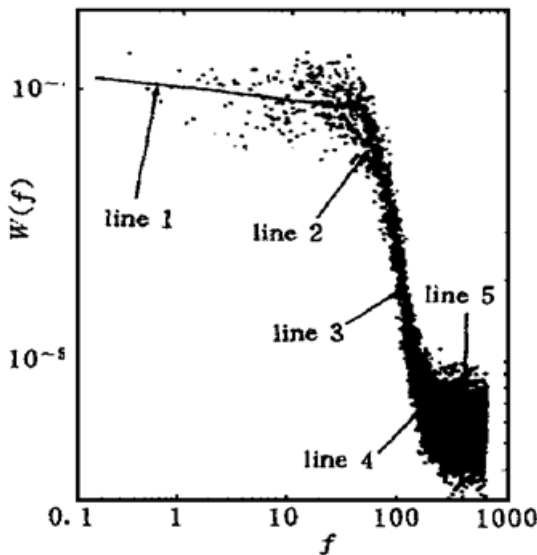


图 1 功率谱 5 线段拟合的一例, Line 3 对应于无标度区间

Fig. 1 An example of fitting the power spectrum as a sum of 5 pieces of straight lines. The region where Line 3 is present is taken to be the scaling region

具体的拟合过程为: 首先将整个对数频率范围分为一定数目的等间距的单位区间, 对由这些单位区间组成的所有可能的 5 个大区间分别进行线性拟合, 拟合余差最小的那种组合即为我们所要求的最佳拟合结果。在拟合时未加任何约束条件(例如一般分段拟合要求相邻两段直线结合处应具备相等的函数值), 因而所获得的无标度区间为最佳选择。

图 1 是利用上述方法对功率谱进行拟合的一个具体例子。在图中 Line 1 对应于低频段的常数区, Line 5 对应于高频段的噪声区, 而 Line 2 对应于常数区与无标度区间的缓变区域, Line 4 对应于无标度区间与噪声区之间的缓变区域, Line 3 对应于无标度区间, 在此区间内功率谱很准确地满足标度律。

4 功率谱无标度区间标度指数

在以下关于功率谱特性的分析中, 以激光传播的起伏强度为参考, 起伏强度通常用闪烁指数 β^2 (即

光强起伏的归一化方差 $(\overline{I^2} - T^2)/T^2$ 来表示。图 2(a), (b) 分别表示 1997 年冬季和夏季功率谱无标度区间的标度指数与闪烁指数的关系。总的来说, 虽然数据比较分散, 但都存在着较为明显的趋势。在冬季, 标度指数与闪烁指数的对数基本呈线性关系, 起伏强度越大, 标度指数的绝对值越大。在夏季, 当起伏强度小于大约 0.1 时, 标度指数与闪烁指数的对数成明显的线性关系, 起伏强度越大, 标度指数的绝对值越大; 而当起伏强度大约等于 0.1 时, 上述线性关系趋于饱和, 而后标度指数的绝对值随起伏强度的增加反而减小。

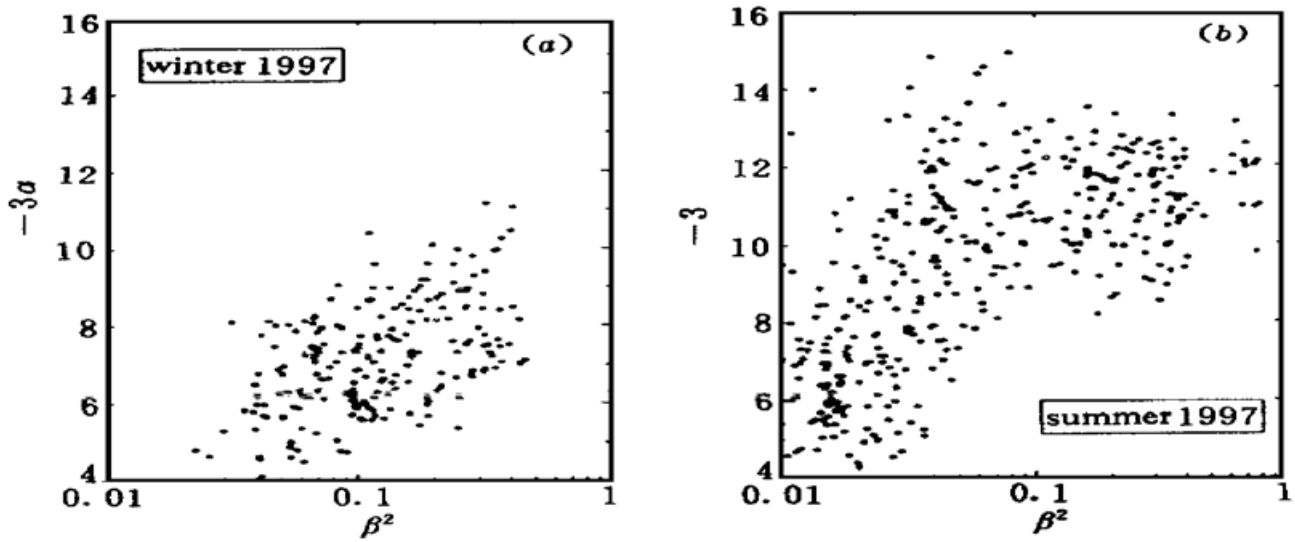


图 2 功率谱无标度区间的标度指数(乘以-3)与闪烁指数的关系
(a) 1997 年冬季; (b) 1997 年夏季

Fig. 2 The scaling exponent (multiplying a factor of -3) of the power spectrum as a function of the scintillation index in the winter (a) and in the summer (b) of 1997

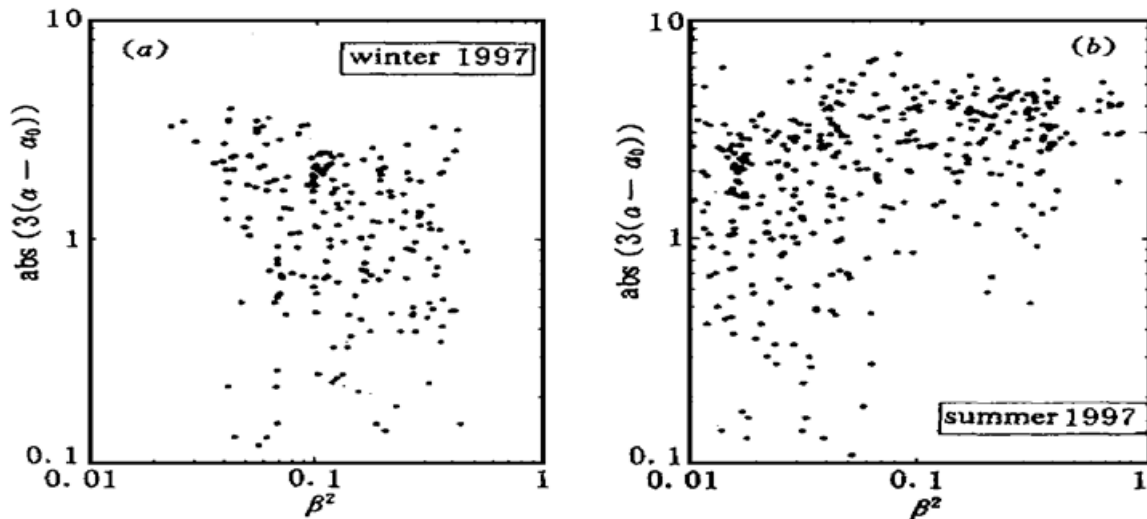


图 3 功率谱无标度区间的标度指数与理论值的绝对偏差(乘以 3)和闪烁指数的关系
(a) 1997 年冬季; (b) 1997 年夏季

Fig. 3 The absolute deviation (multiplying a factor of 3) of the scaling exponent of the power spectrum of the log-intensity from the theoretical value as a function of the scintillation index in the winter (a) and in the summer (b) of 1997

从图 2 还可以看出, 在冬季标度指数的绝对值高于理论值的数据少于低于理论值的数据, 平均值为 7.191/3, 低于理论值 8/3, 标准差为 1.423。而在夏季标度指数的绝对值高于理论值

的数据远多于低于理论值的数据, 平均值为 $9.336/3$, 高于理论值 $8/3$, 标准差为 2.560 。无论冬季或夏季, 在各种起伏强度下, 对大部分数据而言, 标度指数 α 都与理论值 α_0 存在差别。这种偏差与起伏强度的关系可以从图 3 中看出。

图 3 (a), (b) 分别描绘了冬季、夏季功率谱的无标度区间的标度指数 α 与理论值 α_0 的绝对偏差和闪烁指数的关系, 可以看出: 无论冬季或夏季, 在各种起伏强度下, 标度指数 α 都可能与理论值 α_0 存在很大的差别。在冬季, 虽然数据存在着较大的离散性, 但随着闪烁指数的增大, 标度指数 α 与理论值 α_0 的绝对偏差随之减小。而在夏季, 数据存在着更大的离散性, 尽管没有很明显的规律, 但随着闪烁指数的增大, 标度指数 α 与理论值 α_0 的绝对偏差有一定的增大趋势。

参 考 文 献

- 1 J. W. Strohben. Laser Beam Propagation in the Atmosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 129~ 170
- 2 S. Panchev. Random Functions and Turbulence. Beijing: Science Press, 1976. 116~ 121
- 3 V. I. Tatarski. Wave Propagation in a Turbulent Media. Beijing: Science Press, 1978. 134

Characteristics of the Power Spectrum of Laser Irradiance Scintillation in a Real Atmosphere

Rao Ruizhong Wang Shipeng Liu Xiaochun Gong Zhiben
(Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and
Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract A 5-line fitting method was established to determine the scaling region of the power spectrum of the log-intensity of a laser beam in the turbulent atmosphere. From the relationship between the scaling exponent and the scintillation index we found that the characteristic of the power spectrum is different for the winter and the summer. In most cases the scaling exponents depart from theoretical values for a local isotropic turbulent medium.

Key words light propagation, turbulence, scintillation, power spectrum