

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0783-04

复杂传播路径条件下激光光强起伏特性研究

王世鹏 饶瑞中 刘晓春

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学研究室 , 合肥 230031)

摘要 : 对复杂地形情况下实际湍流大气中的激光强度起伏进行了系统的实验观测 , 分析了光强起伏统计特征的周日及全年变化规律。结果发现 , 复杂地形情况下实际湍流大气中的激光光强起伏 , 不论是概率密度分布还是其功率谱等统计特征均与理论上的偏离很大。

关键词 : 光传播 ; 大气湍流 ; 光强起伏

中图分类号 : TN012 文献标识码 : A

1 引 言

迄今为止 , 激光大气传播的湍流效应理论与实验数据处理方法基本上是在建立在大气湍流满足局地均匀各向同性基础上的(科尔莫戈罗夫湍流统计理论)。而很多情况下 , 实际大气湍流很难严格满足局地均匀各向同性的条件。开展非均匀传播路径条件下激光强度起伏的研究 , 不仅能提高对实际大气中激光强度起伏规律的认识 , 而且对激光大气传输的实际应用具有一定的意义。

1998 年 , 在中国合肥地区进行了传输距离为 1000m 的复杂传播路径条件下的湍流大气中激光强度起伏的全年的系统实验观测 , 基于实验结果分析了激光强度起伏统计特征的周日及全年变化规律。

2 实验系统

实验系统如图 1 所示 , 波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 、输出功率 30 mW 的 He-Ne 基模激光通过 1000 m 的湍

流大气后 , 经 0.35 mm 小孔及干涉滤光片 , 入射到光电倍增管 , 光电倍增管的输出信号经探测系统主机放大并通过 A/D 转换后由计算机以 2000 Hz 的采样速率实时采集。激光器前安置遮光器以测得背景及探测器件本身噪声的影响。每次实测时 , 计算机通过数据采集卡中 I/O 口发出信号 , 遥控遮光器通过无线接收装置接收到该信号 , 经控制器使遮光器闭合遮拦激光 , 此时进行 8 s 的背景噪声测量 , 将数据存盘 , 而后遮光器打开 , 进行 35 s 的激光信号的数据采集 , 将数据存盘。实验持续 24 h 进行 , 每 10 min 采集一次。

为较好地探索实际大气湍流对激光强度起伏的影响 , 实验观测一般选择在天气条件基本相近的情形下进行 , 由于合肥地区全年晴朗且基本无云的天数很有限 , 我们每月至少选择一天进行观测。实验观测的地形条件为 : 前 130 m 草坪 , 中间 50 m 塘面和埂坝(埂坝约 1 m) , 后 820 m 水面 , 总的传输距离为 1000 m。

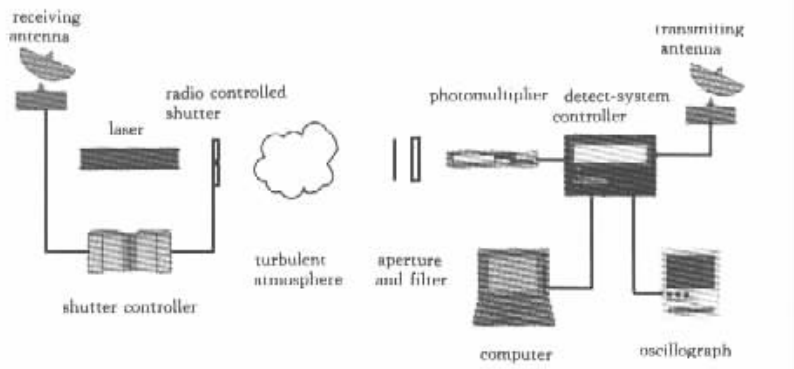


Fig.1 Configuration of the experiment

3 实验结果分析

3.1 光强起伏方差的日变化

光强起伏方差反映出激光传播的起伏条件,其归一化的值即闪烁指数 β^2 为:

$$\beta^2 = (I^2 - \bar{I}^2) / \bar{I}^2, \quad (1)$$

式中 I 为激光强度, \bar{I} 为统计平均。

众所周知,在传播路径均匀情形下,光强起伏方差的变化趋势与日出、日落有明显的关系,即日出日落时分最小,白天起伏大,夜晚起伏小^[1]。即使是下垫面不很均匀、传输距离 500 m 的激光大气传输的实验观测结果也表现出同样的变化趋势^[2]。

但从我们全年观测的闪烁指数 β^2 的日变化趋势来看, β^2 有时或在日出时分(如 2、3、4 月)或在日落时分达到极小(如 1、5、8、9、10、11 月),但在一天之内,没有出现日出日落时分均极小的现象;有时 β^2 与日出日落无明显的关系(如 6、7 月);有的与日出日落有一定的关系(如 12 月)。总的来说,闪烁指数 β^2 与日出日落没有明确的日变化趋势。

引起上述现象的因素在于激光传播下垫面的非均匀性以及当时的气象要素参数(尤其是风速、风向)。近地面大气湍流主要是由大气中平均流场与大气温度的分布、复杂的下垫面、气象要素等因素,所引起的近地面大气温度与风的垂直方向上的不均匀分布而形成的。而太阳辐射过程最为显著的特点是日变化,日射的很大部分被反射回大气而没有完全用于加热地表,反射率的大小取决于地表状态,如陆地表面反射率一般为入射辐射的 8%~40%;而平静水面,在太阳光仰角超过 60° 时,反射率只有 2%~3%。同时由于陆地与水的导热率、比热的不同,使得水具有蓄积热能的特性,而陆地能较快地把能量传输给大气^[3]。从实验观测地形条件来看,传输路径中水面与陆地表面上的大气湍流特性有所不同,加上陆地与水面交界处有更为复杂的大气湍流状态。同时,实验观测天气条件即使同为晴朗天气,天气条件仍会有所不同,如云的厚薄、风向及大小、能见度高低等等,所有这些因素的存在使全年整个传播路径上的大气湍流状态变得更为复杂,表现为闪烁指数 β^2 与日出日落没有明确的日变化趋势。

3.2 强度起伏的概率密度分布

理论上,弱起伏传播条件下激光对数强度起伏概率密度分布为正态分布^[4]。而我们观测到的闪烁指数 β^2 超过弱起伏范围的概率很大,为较好地反映实验观测的激光对数强度概率分布偏离正态分布的

程度,我们以对数强度 $\ln I$ 为研究对象^[1],引进概率密度分布的偏斜度 γ_1 和陡峭度 γ_2 , 定义为:

$$\gamma_1 = \mu_3 / \mu_2^{3/2}, \quad \gamma_2 = \mu_4 / \mu_2^2 - 3, \quad (2)$$

其中 μ_2 、 μ_3 、 μ_4 分别为 $\ln I$ 的二阶、三阶、四阶中心矩。偏斜度反映概率分布相对于均值的非对称性。若为正态分布,偏斜度为零;若偏斜度为正,说明低于均值的出现概率大于高于均值的出现概率;反之亦然。陡峭度反映概率分布相对于正态分布的集中程度。若为正态分布,陡峭度为零;若陡峭度为正则概率分布比正态分布更为集中,反之则比正态分布发散。偏斜度、陡峭度的绝对值愈大,说明概率分布偏离于正态分布愈远。

图 2 为夏、冬两季闪烁指数与偏斜度的关系曲线。结果表明,闪烁指数与偏斜度存在较为明显的变化趋势,即随闪烁指数的增加,偏斜度也急剧增加,同时偏斜度总是为正(即低于均值的概率大于高于均值的概率)。图 3 反映偏斜度和陡峭度夏、冬两季的变化关系,两者的对数存在着较为明显的线性关系,当对数强度起伏概率分布偏离正态分布时,其对称性与集中程度同时发生改变,而陡峭度的增加比偏斜度的增加更为急剧。对全年数据的进一步分析,发现春冬两季情况相似、夏秋两季情况相似。

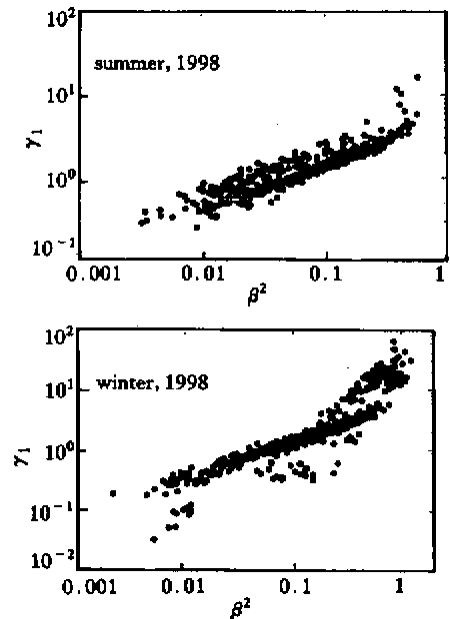


Fig. 2 The relationship between the scintillation index and the skewness of the probability density function of the log-intensity in summer and in winter, 1998

从偏斜度、陡峭度的绝对值不难看出,在下垫面复杂情形下,通过 1000 m 湍流大气后的激光强度起伏的概率密度分布的实验结果与弱起伏传播条件下的理论结果相差甚远。

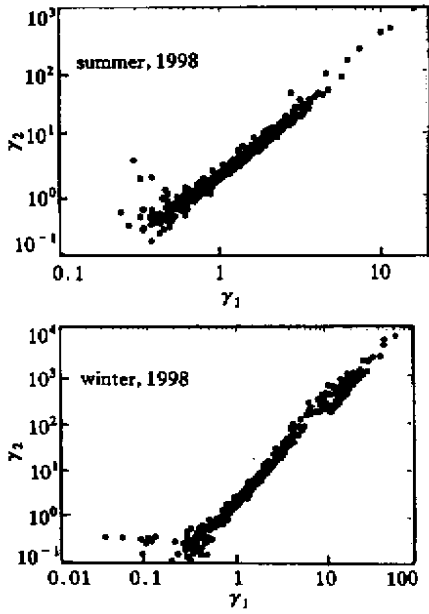


Fig.3 The relationship between the skewness index and the kurtosis of the probability density function of the log-intensity in summer and in winter, 1998

3.3 讨论

将这次传播距离 1000 m 得到的实验结果与我们以前进行的传播距离 500 m 的激光大气闪烁效应观测结果^[2]相比:不仅在光强起伏方差的日变化趋势上,而且在强度起伏的概率密度分布上两者均表现出明显的差异。传播路径的不同显然是引起这一现象的主要因素。

由于激光在湍流大气传播过程中强度起伏的功率谱特征在一定程度上反映出湍流介质折射率场起伏的统计特性,下面我们以强度起伏的功率谱特征对此进行分析。

研究表明^[4]:对数强度的功率谱可以分为低频段和高频段两个区间。低频段主要部分,功率谱呈常数,而高频段的大部分范围,功率谱与频率呈指数变化关系,即在湍流介质中传播的不论是平面波还是球面波,其对数强度起伏的功率谱在频率很高时呈标度律:

$$W_{ln}(f) \propto f^{\alpha_0}, \quad \alpha_0 = -8/3. \quad (3)$$

以五线段拟合法^[5]对 500 m 非均匀传播路径下的激光大气闪烁效应的功率谱进行分析处理,其结果如图 4(a)所示,不同的只是由实验数据求得的标度指数 α 与 α_0 存在着明显的差异;而 1000 m 非均匀传播路径下的激光大气闪烁效应的功率谱实验结果,大部分也如图 4(a)所示,不同的也是由实验数据求得的标度指数 α 与 α_0 存在明显的差异;但对 1998

年 1 月 20 日的实验数据分析,发现功率谱出现明显的异常,即在高频处出现不明原因的能量抽运,如图 4(b)所示。我们注意到出现图 4(b)情况的实验期间,是雪后晴天、地面尚有余雪,湖面上近岸有冰。这种反常的频谱特征是否与特殊的天气条件有关,我们无法给出合理的解释,同时现有的理论也无法解释这一现象。

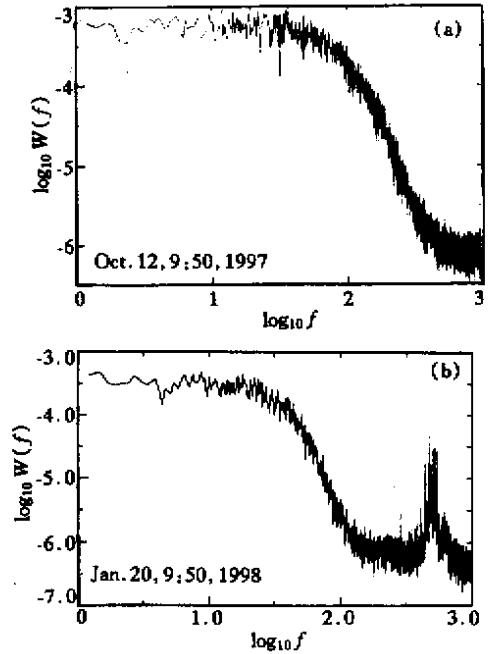


Fig.4 Power spectrum of log-intensity fluctuation of laser beam in turbulent atmosphere in 1997 and 1998

不管引起上述反常频谱特征的原因何在,首先该现象进一步表明传播距离 1000 米、下垫面非均匀的大气湍流状态明显比 500 m、下垫面非均匀的复杂,同时由于在高频部分出现了显著增大的现象,说明大气湍流对光传播的影响并不是如理论上认为的总在低频部分,从而会直接影响到自适应光学中的带宽问题。

小结 结合复杂传播路径条件(下垫面主要为水面)下激光强度起伏的实验观测结果及其分析,得出以下结论:激光强度起伏的闪烁指数与日出日落无明显的变化趋势,对数光强起伏的概率密度分布与正态分布偏离很大,偏斜度与陡峭度总是为正,偏斜度和陡峭度的对数存在着较为明显的线性关系。激光强度起伏的闪烁指数与偏斜度、陡峭度无明显的变化趋势,其中春冬两季的情况相似,夏秋两季的情况相似,而且春冬与夏秋明显不同。

总之,复杂地形条件下实际湍流大气中的激光光强起伏,不论是概率密度分布还是其功率谱等统

计特征均与理论上的偏离很大。

参 考 文 献

- [1] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春等. 实际大气中激光闪烁的概率分布. 光学学报, 1999, 19(1) 81~86
 [2] 王世鹏,饶瑞中,刘晓春. 实际大气中激光强度起伏的

全年统计特征. 光学学报, 1999, 19(3) 390~397

- [3] Barry R G, Chorley B J. 大气、天气和气候. 北京: 高等教育出版社, 1982. 12~35
 [4] Strohben J W. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 129~170
 [5] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春等. 实际大气中激光闪烁的频谱特征. 中国激光, 1999, A26(5) 411~414

Observation of Statistical Properties of Laser Irradiance Scintillation over Complex Terrain

Wang Shipeng Rao Ruizhong Liu Xiaochun

(*Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

(Received 27 March 2000; revised 24 May 2000)

Abstract: A series of measurements of the irradiance scintillation of a He-Ne laser beam propagating over complex terrain were carried out. The statistical properties of the irradiance scintillation, such as the scintillation index, probability distribution, and power spectrum were analysed. It was found that these statistical properties of the irradiance scintillation over complex terrain greatly deviate from the theoretic results.

Key words: light propagation; atmospheric turbulence; irradiance scintillation