

光学学报

实验室湍流模拟装置在大气光学中的应用

饶瑞中^{1*}, 袁仁民^{2**}

¹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;

²中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026

摘要 大气湍流的光学特性在大气科学和光电工程应用研究中有重要影响。鉴于实际大气条件的复杂多变和实验条件的限制,在实验室内建立可控的、有限尺度的人工湍流模拟装置作为大气湍流的替代者,已成为相关研究的重要技术途径,在自适应光学技术中的相位模拟、自由空间光通信等光电工程设计中发挥了重要作用。目前,对海洋湍流中的光传播与成像、新兴光电工程的大气影响、特殊结构光束的大气传播的研究也借助于湍流模拟装置。为了充分发挥实验室湍流模拟装置的优势,本文深入分析了实验室人工湍流模拟装置的性能及其局限性。实验室内产生的人工湍流无疑可以用于探索一种随机介质对光传播影响的定性甚至半定量规律。但必须注意到:有限空间内产生的湍流只有在远离边界的较小空间内才具备均匀各向同性的特性,采用各向同性湍流统计理论分析湍流模拟装置中的全路径光传播效应是不严谨的。如果以此类装置研究光传播的定量规律,必须首先根据光电应用场景设计具有光学相似性的模拟装置,然后清楚了解湍流装置内的湍流特性的空间结构,并据此开展理论分析。

关键词 大气光学; 大气湍流; 湍流模拟装置

中图分类号 O439; P183.4; O436.2; O357.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230485

1 引言

光波在随机介质(如湍流大气、海水)中的传播规律是一项重要的基础科学研究,也是现代许多先进光电技术系统在大气和海洋环境中应用的基础^[1]。湍流大气介质由作为流体的、速度和密度起伏的大气分子构成,大气密度的微弱变化造成大气介质折射率微弱起伏,导致大气介质光学性质随机变化。现代光电工程的应用场景大都位于大气层内或穿越大气层,光在湍流介质中传播时出现光强起伏(闪烁)、相位起伏(包括波前倾斜)和到达角起伏(光传播方向抖动)、图像扭曲和变形,具有较强的时间、空间变化特征。光在湍流大气中的传播规律影响先进光电工程技术系统设计及其工作性能。目前,天文观测、自由空间光通信、光学时频传递、光学遥感、环境监测、激光工程等先进光电系统都非常重视湍流大气造成的影响。

湍流是物理学最大的难题之一,目前对大气湍流的认知还很不完善,虽然有各种湍流理论,但只有Kolmogorov-Obuhov统计理论在大气光传播研究中得到应用。苏联科学家Tatarskii^[2]奠定了大气湍流中的光传播理论的基础,即对光场采用Rytov近似(对数光场的Born近似)和Kolmogorov湍流统计理论。对于

局地均匀、各向同性的湍流,明确知道统计特性的是位于中等空间频率区域的惯性子区,而对于低频的能量注入子区,湍流功率谱的形式存在着各种变化,与具体的因素有关。惯性子区间涉及湍流的两个特征尺度——内尺度和外尺度。这两个尺度对光传播的起伏特性都有重要影响。实际上,湍流特征尺度(内尺度、外尺度)是定性概念,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,但一些应用中却明确利用了特征尺度的定量数据。

实际大气湍流因时因地而异,在较长时间内很难维持较为稳定的状态,较长距离的实验场地很难实现湍流均匀分布,而对路径湍流分布的细致监测往往存在困难,系统的外场实验需要一定的人力物力投入,因此,受限于实际条件,在实验室内建立人工湍流模拟装置成为一种技术路线^[3-10],目前已有不少研究团队采用这种技术路线,建立了相应的模拟装置,并开展了湍流特性测量等相关模拟研究工作^[11-19],在自适应光学技术^[20-21]、大气边界层结构研究^[22-23]、激光大气传输^[24-28]等领域发挥了重要作用。在光传播研究和光电工程性能分析中,往往把这种装置产生的随机介质当作符合Kolmogorov局地均匀、各向同性的湍流介质处理,实验结果套用相关理论,有简单化的态势。为了充分发

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(42075131)

通信作者: *rao@aiofm.cas.cn; **rmyuan@ustc.edu.cn

挥实验室湍流模拟装置的优势,本文深入分析了实验室人工湍流模拟装置的性能及其局限性,使其在随机介质光传播基础研究和先进光电工程应用中发挥应有的作用,避免不必要的投入和可能带来的认知偏差。

人工模拟湍流的实验室种类较多,实际上真正模拟“湍流”的装置中的介质应该是流体,因此一些模拟随机介质中的光传播随机相位的装置如随机相位板、液晶电视(LCTV)空间光调制装置^[29],或者其他类型的人工干预大气介质获得需要的湍流特性的装置^[30]不在本文的讨论之列。

2 以空气和水为介质的对流湍流模拟装置

本着简化问题的初心,以及考虑到实验室空间的限制,实验室湍流模拟装置的三维尺度大都在 m 量级,即其体积约为 1 m^3 。由于一般科学研究或工程应用中的光传播距离为 km 量级,甚至 10^2 km 量级,因此对湍流模拟装置的最主要技术要求是模拟的湍流能产生远大于实际大气的湍流强度,而对湍流的特征尺度和时间特性方面的考虑甚少。理想的结果应该是模拟湍流有较好的稳定性,可以进行调控,从而得到不同的湍流状态。模拟湍流应具有和大气湍流相似的时空结构,参照近地面充分发展的大气湍流,惯性区包含从 mm 量级到 m 量级的尺度范围。从时间变化特征来看,在 m/s 量级的风速下,湍流功率谱主要部分能涵盖从 0.1 Hz 到数百甚至 kHz 的频谱区间。

采用流体介质开展实验室人工模拟大气湍流的种类一般分为两种,即直接采用空气或采用水作为流体介质,也有研究以乙醇溶液为流体介质,该类装置可能用在真正的湍流研究工作中,在光传播研究领域尚未有相关装置的报道。在海洋湍流的模拟中,直接采用海水或加入一定 NaCl 的水作为湍流介质。

以有限封闭空间内的流体介质模拟大气湍流是通过热对流的形式实现的。虽然不同装置的具体结构会有区别,但基本的结构是相似的,即在流体的下垫面或下层加热,在流体的上层进行冷却,迫使流体上下层之间产生热力湍流,通过改变温差控制湍流的强度,在一切条件不变的情况下可使流体内部的湍流特性保持平稳。装置技术的发展在于加热和冷却均匀性的改善以及整个系统可控性的优化。图 1 显示了最早由 Bissonnette^[3]建造的用于光传播研究的实验室湍流模拟装置,后续的同类装置基本上都采用了同样的长方体几何结构,在温控方式等方面进行改进或优化。

以空气为流体介质模拟实际大气湍流显然是最直接和便利的。由于介质相同,为了增大湍流强度,必须增大装置内空气的温度梯度或气压。目前没有看到关于密闭箱体增压的报道,都是通过加热来增大温度梯度的。所谓热风式湍流模拟装置是指对装置内空气进行加热、抽运热空气以产生湍流,通过改变加热温度和

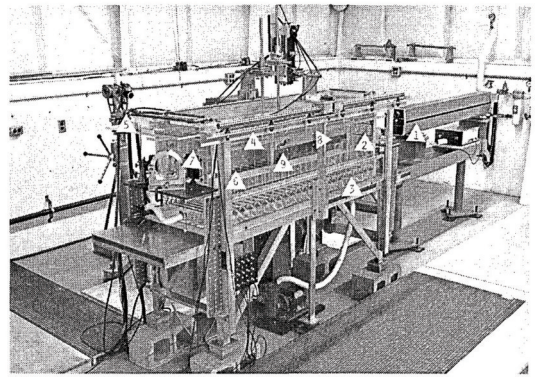


图 1 最早出现的用于光传播研究的实验室湍流模拟装置^[3]
Fig. 1 The first turbulence simulation apparatus for light propagation study in laboratory^[3]

风速来改变空气内部湍流强度的装置。

以空气为流体介质的典型装置的是 Gamo 和 Majumdar^[4]于 1978 年建立的湍流池,其 x 、 y 、 z 方向的长度分别为 0.78 m、0.23 m 和 2.59 m,其内部湍流符合均匀各向同性的区域为 $0.5 \text{ m} \times 0.05 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。当温度为 $53 \text{ }^\circ\text{C}$ 、风速为 0.41 m/s 时,模拟的折射率结构常数 C_n^2 为 $3 \times 10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$,内外尺度分别为 5 mm 和 65 mm,其外尺度远小于实际大气的外尺度(m 级、10 m 级,甚至更大)。

以水为介质的优点是其折射率随温度的变化率比空气介质大两个数量级,容易产生高强度的湍流,便于模拟长距离的光传播问题。这类湍流模拟装置主要由下面加热、上面冷却的两块平行平板构成。精确控制两板间的温差或者控制加热、冷却功率以及环境条件,就有可能精确控制介质的湍流特性。但由于水介质的导热系数远大于空气,要获得均匀及宽惯性区的湍流比较困难。

以水为介质的典型装置是 Bissonnette^[3]于 1977 年建立的湍流池,该模拟装置的尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 。在这个湍流池的底部用分散分布的加热管直接进行加热,均匀性较差。模拟湍流的惯性区很窄,仅 2 cm,缺少低频大尺度的温度起伏。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采用大面积平板式二次加热和二次冷却的方式,改善了加热和冷却平面的温度均匀性^[5]。使用这种技术改善的湍流池产生的模拟湍流具有较宽的惯性区,同时也得到了统计特征平稳的湍流。

3 模拟湍流的结构特性及其测量

建立实验室湍流模拟装置的目的是产生一个性质稳定且可控的随机介质作为实际大气湍流介质的替代物,方便开展各种应用的光传播实验。图 2 所示为经过湍流池传播的准直激光束的光强起伏特征的空间分布。对模拟湍流的基本要求是其统计特性和大气湍流的统计特性相仿。二者之间是否完全相似并不是关

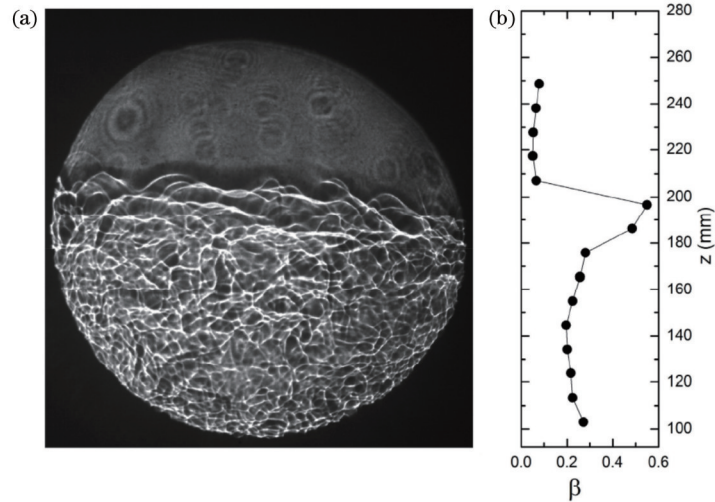


图 2 经过湍流池传播的准直光束的横截面光斑分布及对应的光强起伏方差分布^[26]。(a)横截面光斑分布;(b)对应的光强起伏方差分布

Fig. 2 Cross-section of a collimated laser beam through a turbulence simulation apparatus and the normalized light intensity variance profile^[26]. (a) Cross-section of a collimated laser beam; (b) normalized light intensity variance profile

键,重要的是,我们应该知道模拟湍流的实际特性,根据相似性规律将模拟湍流介质中的光传播结果外推到实际应用环境中。

温度和风速是表征模拟湍流介质的主要物理参数,可直接对温度、速度的结构分布特性进行测量,并通过温度、速度随加热时间的变化趋于稳定状态来推断湍流特性也达到了稳定状态。在典型的湍流模拟装置中,通过精密的调控使沿光路的温度分布和风速分布在中轴线周围保持较高的均匀性,但在中轴线的两端不均匀性明显增大。目前,我们虽然对整个模拟湍流介质的一些主要特征有了基本认识,但对湍流特性的完备测量工作是缺乏的。

在实验室湍流模拟装置中,温度测量元件一般为铂丝/膜电阻,并使用温度脉动计测量温度起伏,在光传播路径两端利用光强闪烁测量平均 C_n^2 或利用到达角起伏测量相干长度 r_0 。对于二维流场的测量,利用示踪粒子(铝粉、氢气泡等)显示流场。

无论是基于光传播的应用目的还是以光传播效应检测模拟湍流强度的目的,在模拟装置中沿光路(中轴线)进行 C_n^2 、温度分布等直接测量的工作相对于全面测量工作要多一些。有关湍流强度随路径均匀分布的假定也以此类工作的结果为依据。

相对来说,大量的检测工作完全依赖沿模拟装置中轴线开展的光传播效应参量的测量,根据随机介质中的光传播理论结果,利用光强起伏、光斑漂移、到达角起伏等传播参量来得到模拟湍流介质的相干长度 r_0 ,或等效的折射率结构常数 C_n^2 ,并将其作为模拟湍流强度的度量。通过建立温差与 r_0 的依赖关系来对模拟装置进行标定,使之成为一定湍流强度下的标准湍流介质。

用大气相干长度(Fried 参量 r_0)描述模拟湍流的强度是大多数此类装置应用中常见的做法。必须注意到:1) r_0 是湍流强度 C_n^2 的直接路径积分量,仅与到达角起伏、湍流介质光学传递函数、光束质量等光传播效应直接相关,而其他光传播效应取决于湍流强度 C_n^2 的加权路径积分,它们并非 r_0 的函数。因此,仅以 r_0 描述模拟湍流的强度在很多光电工程应用中是不够的。2) r_0 是一个统计平均参量,理论的测量值要求湍流介质满足各态历经假定,而实际测量是在有限时间获得的有限样本统计平均得到的,因此其测量值是存在概率分布的^[31-32]。对于一定状态的模拟装置,在有限的测量应用中,不可能存在一个唯一固定的 r_0 值。

利用光传播效应获得等效的湍流强度 C_n^2 作为模拟湍流的度量比 r_0 作为模拟湍流度量的难度更大, r_0 作为路径积分量,至少理论上是一个单一值,而 C_n^2 要求传播路径上湍流强度均匀分布,这在模拟湍流中是无法实现的(至少在两个端点附近),用这样一个参量去分析实验结果将会带来无法预期的偏差^[33]。

限于湍流模拟装置的物理尺度,模拟湍流的外尺度远小于实际大气的外尺度(m级、10 m级甚至更大),因此无法可靠地模拟实际大气中的光传播参量的频谱特征。鉴于光传播起伏频谱特征并非在所有传播条件下对应于湍流惯性区的湍流频谱特征^[34],因此在湍流池中开展的光传播效应的频谱特征研究或根据这些频谱特征获取的湍流特征尺度的结果是不可靠的。

4 利用湍流模拟装置可以开展的科学研究

大气湍流模拟装置当然可用于大气湍流本身特性的研究。虽然各种大气探测技术被用来进行大气湍流

结构的研究并获得了一定的成果,但鉴于大气湍流涉及多种复杂多变且不受人力控制的因素,要获得清晰的实际大气湍流结构还是比较困难的。实验室对湍流模拟装置为大气湍流结构研究提供了一种有意义的技术手段。通过模拟太阳辐射加热大气介质和地表,利用光学成像技术可以获得不同高度的流体结构特征。利用这些结果指导实际大气探测的研究思路,可以获得有意义的新结果。本文主要着眼于湍流模拟装置在光电工程中的应用,具体讨论如下。

4.1 大气与海水中光传播效应

弱起伏条件下随机介质中光传播理论的正确性正是通过大气湍流中的光传播实验的检验而确立的;强起伏条件下没有通用的光传播理论体系,一些传播规律是通过数值模拟获得的,并且得到了强起伏条件下传播实验的验证。对长距离传播路径湍流条件的精确测量难度较大,模拟大气湍流介质的一种常用研究手段是数值模拟。

以空气为介质的湍流模拟装置可产生 1000 倍于实际大气的湍流强度,模拟的传播问题对应的传播距离为 km 量级;以水为介质的湍流模拟装置可产生强度更大的模拟湍流,模拟的传播问题可以对应更长的距离。虽然一定性能的自适应光学系统的相位校正效率随大气湍流强度增大而降低的定量关系通过湍流模拟装置得到,但迄今为止尚未有一种光传播效应理论研究结果是通过湍流模拟装置得到验证的。

用于各种具体的光电系统(如自由空间光通信)的湍流模拟装置,实际上都是模拟各自光源的光传播效应对所关心的技术参数的影响^[35-37]。

4.2 自适应光学相位校正

自适应光学相位校正技术的问世就是为了克服大气湍流对光传播的影响,然而自适应光学相位校正技术并不是只能应用在大气中的光传播问题。对于光电工程中涉及的各种光传播影响因素带来的随机相位起伏,都可以运用相位校正技术进行补偿。因此在自适应光学技术的设计和使用中,真正关心的是对到达波前校正器位置的入射波前的可靠测量,此波前偏离理想波前的程度是衡量被校正波前畸变的主要技术参数。

表征自适应光学系统技术性能的主要因素是空间分辨率和响应时间。如果光通过实验室湍流模拟装置产生的相位畸变能达到足够大的幅度和时空变化范围,便可以检验自适应光学系统的性能。并非符合大气湍流特征的模拟湍流才能产生波前畸变效果,利用任何随机介质都可以达到此目的。当然,如果要研究自适应光学技术对大气湍流的相位校正效果的定量规律,模拟的湍流应该符合大气湍流特征。

5 湍流模拟物理相似的要求

前文介绍了迄今为止的典型大气湍流实验室模拟

装置及其在光电工程中的应用,并指出其潜在的问题。鉴于实验室湍流模拟装置的发展呈现出强劲的势头,将来可能有更多的相关装置进入设计和建造阶段,为了使这类装置的性能更为可靠、用途更为广泛,有必要再次强调对光传播物理模拟相似性的要求。物理模拟相似包括流体流动性相似和光传播条件相似两个方面。

5.1 流体流动相似

光电工程工作在大气或海水中,实验室湍流模拟装置所使用的流体介质如果和实际介质不同,那就必须满足流体流动相似要求。流体流动相似包括几何相似、运动相似、动力学相似等,其中最重要的是物理模拟的形态比(几何相似)和雷诺数(动力学相似)与应用场景中的形态比和雷诺数相等。关于这个问题的研究详见文献^[38],这里就不作详细说明。

5.2 光传播条件相似

建立实验室湍流模拟装置的目的在于对光电工程涉及的光传播效应进行仿真研究,因此模拟装置不仅要满足作为介质的流体特性相似性,还需要满足光传播条件的相似性,否则不可能得到有参考意义的结果。光传播条件的相似性可以从光传播方程出发进行分析,主要涉及光源特性、传播条件(它们由几个特征尺度表征)和起伏条件。

在折射率为 n 的介质中传播的单色波长为 λ (波数 $k=2\pi/\lambda$) 的电磁波,其电场由 Maxwell 波动方程描述,对于一般的光学应用,湍流内尺度远大于波长,可对沿 z 方向传播的光进行傍轴近似,将电场的任一分量 E 表示为 $E = u \exp(ikz)$,得到

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \nabla_{\perp}^2 u + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} + k^2(n^2 - 1)u = 0, \quad (1)$$

式中: $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 。对于空气介质, $n \approx 1$, 令 $n_1 = n - 1$, 则式(1)简化为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2k} \nabla_{\perp}^2 u + ikn_1 u. \quad (2)$$

从以上两式可以看出,湍流介质中的传播过程与光场在传播方向(z)和垂直于传播方向(x, y)的空间尺度以及折射率场的特征尺度有关。根据湍流介质中的光传播理论,涉及的主要特征尺度有:1)反映湍流本身特性的特征尺度,包括湍流内尺度 l_0 和外尺度 L_0 ; 2)反映光传播几何特征的 Fresnel 尺度 $l_{Fr} = (L\lambda)^{1/2}$, 其中 L 为光传播距离; 3)反映湍流降低光波相干性的空间相干长度 r_0 ; 4)光学系统中有关光源的特征尺度,该尺度与光电应用密切相关,如光源或发射孔径的直径 D 等。

湍流模拟装置应该能够体现出上述特征尺度之间的相对关系,在此基础上,湍流起伏强度应能达到由闪烁起伏 Rytov 指数来表达的弱起伏或强起伏条件。

6 结 语

越来越多的先进光电工程应用问题涉及大气湍流

的影响,许多研究和应用部门没有合适的条件开展实际大气湍流中的光传播实验,在实验室内建立了人工湍流模拟装置用于分析大气湍流对所关心的科学或技术问题影响。此外,在海洋湍流中的光传播与成像、特殊结构光束的大气传播等基础研究中也有借助于湍流模拟装置者。为此,分析了以空气和水为流体介质的两类湍流模拟装置的性能特点,讨论了这些装置产生的模拟湍流与实际大气湍流的相似性与区别,根据装置在光电工程中涉及的激光大气传输研究和自适应光学相位校正技术中的应用情况,提出了要合理、谨慎利用这类湍流模拟装置的观点。

由于先进光电工程领域发展迅猛,其应用的领域范围越来越大。相关光电系统的设计和应用都涉及光在大气湍流中的传播问题,迫使越来越多的科研和技术工作者涉猎随机介质中的光传播理论,限于学科基础和工程问题的简单化处理,难免会出现一些基本的概念和原理运用的不严谨之处,特别是一些理论的适用条件被不适当放宽,导致结果的可靠性严重存疑。这些问题不仅会出现在光传播效应的基础研究工作中^[39],也会出现在技术运用中。

为了更好地发挥实验室湍流模拟装置在大气光学研究与光电工程性能分析和工程设计中的作用,要对实验室模拟湍流的时空特性进行深入细致的测量研究和数值仿真研究。在得到充分认识的基础上,设计出几何形态更优化的模拟装置(目前存在的实验室湍流模拟装置大多都是长方体的)。

随着对各种具体条件下的大气湍流特性的深入研究,实际大气湍流特性十分复杂,满足局地均匀各向同性、可以用Kolmogorov理论准确描述的情况是不多的^[40],在实验室内可靠模拟各种大气湍流特性无疑是十分困难的,本文论及的人工湍流模拟装置的正确使用将提醒我们恰当使用科研设施,可帮助我们获得可靠的研究成果,否则,有可能使我们的工作走弯路。

参 考 文 献

- [1] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] Tatarskii V I. Wave propagation in a turbulent medium[M]. New York: McGraw-Hall, 1961.
- [3] Bissonnette L R. Atmospheric scintillation of optical and infrared waves: a laboratory simulation[J]. Applied Optics, 1977, 16(8): 2242-2251.
- [4] Gamo H, Majumdar A K. Atmospheric turbulence chamber for optical transmission experiment: characterization by thermal method[J]. Applied Optics, 1978, 17(23): 3755-3782.
- [5] 肖黎明, 马成胜, 翁宁泉, 等. 对流湍流发生池的设计与性能[J]. 量子电子学报, 1999, 16(1): 86-89.
Xiao L M, Ma C S, Weng N Q, et al. The design and properties of convective turbulence cell[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1999, 16(1): 86-89.
- [6] Majumdar A K, DiUbaldo J A, Brown-VanHoozer A. Laboratory simulation of atmospheric turbulence for laser propagation: design and characterization[J]. Proceedings of

- SPIE, 1998, 3432: 50-56.
- [7] Onur K, Laurent J, Colin B, et al. Hot air turbulence generator for multi-on jugate adaptive optics [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5162: 49-57.
- [8] Jolissaint L. Optical turbulence generators for testing astronomical adaptive optics systems: a review and designer guide[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118(847): 1205-1224.
- [9] Matt S, Hou W L, Goode W, et al. Introducing SiTTE: a controlled laboratory setting to study the impact of turbulent fluctuations on light propagation in the underwater environment [J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5662-5683.
- [10] Yuan R M, Mei J, Liu H, et al. Simulation of the microstructural characteristics of saltwater turbulence in a water tank[J]. Optics Express, 2018, 26(18): A844-A854.
- [11] 曾宗泳, 张骏, 翁宁泉. 对流湍流池光学湍流的空间和时间结构分析[J]. 光学学报, 1999, 19(12): 1630-1633.
Zeng Z Y, Zhang J, Weng N Q. Analysis of spatial and temporal structure of optical turbulence in the convective turbulent tank[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12): 1630-1633.
- [12] Majumdar A K, DiUbaldo J A, Brown-VanHoozer A. Measurement and characterization of laboratory-simulated turbulence parameters of interest to adaptive optics imaging and laser communications[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3760: 123-128.
- [13] Magee E P, Welsh B M. Characterization of laboratory-generated turbulence by optical phase measurements[J]. Optical Engineering, 1994, 33(11): 3810-3817.
- [14] 袁仁民, 曾宗泳, 孙鉴泞. 对流水槽温度场和速度场的测量[J]. 量子电子学报, 2003, 20(3): 380-384.
Yuan R M, Zeng Z Y, Sun J N. Measurement methods of temperature field and velocity field in the convective tank[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(3): 380-384.
- [15] 景文博, 赵思, 付强, 等. 湍流特征光学测试对比[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 805-811.
Jing W B, Zhao S, Fu Q, et al. Turbulence characteristics optical test contrast[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 805-811.
- [16] 倪小龙, 宋卢军, 姜会林, 等. 对流湍流池湍流特性与真实大气对比实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 090103.
Ni X L, Song L J, Jiang H L, et al. Contrast experimental research on turbulence characteristics between a simulate turbulence and the real atmospheric turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 090103.
- [17] 倪小龙, 宋卢军, 姜会林, 等. 对流式湍流模拟装置湍流模拟稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100102.
Ni X L, Song L J, Jiang H L, et al. Research on turbulence stability characteristic of convection turbulence simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100102.
- [18] 强希文, 宗飞, 翟胜伟, 等. 大气湍流的实验模拟与测量[J]. 量子电子学报, 2020, 37(4): 506-512.
Qiang X W, Zong F, Zhai S W, et al. Simulation and measurement of atmospheric turbulence in laboratory[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(4): 506-512.
- [19] Li Q Q, Cui C L, Zhu W Y, et al. Analysis of basic characteristics of air convection turbulence simulation device[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12169: 12169AD.
- [20] 张骏, 曾宗泳, 肖黎明, 等. 用于波前补偿实验的对流湍流系统的光学特性[J]. 光学学报, 1997, 17(9): 1259-1264.
Zhang J, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. Optical characteristics of laboratory generated convective turbulence system for wavefront distortion compensation[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(9): 1259-1264.
- [21] 张慧敏, 李新阳. 热风式大气湍流模拟装置的哈特曼测量[J]. 光电工程, 2004, 31(S1): 4-7.
Zhang H M, Li X Y. Measurement of a hot-wind laboratory

- atmospheric turbulence generator with Hartman wave-front sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(S1): 4-7.
- [22] 孙鉴宁, 蒋维楣, 曾宗泳, 等. 对流槽模拟对流边界层实验研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 786-790.
Sun J N, Jiang W M, Zeng Z Y, et al. A laboratory simulation of CBL in a water convection tank[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2000, 36(6): 786-790.
- [23] 袁仁民, 姚克亚, 孙鉴宁, 等. 大气边界层的室内模拟研究: 夹卷层温度场结构分析[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 773-780.
Yuan R M, Yao K Y, Sun J N, et al. A laboratory simulation of atmospheric boundary layer analyses of temperature structure in the entrainment zone[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(6): 773-780.
- [24] Majumdar A K, Gamo H. Statistical measurements of irradiance fluctuations of a multipass laser beam propagated through laboratory-simulated atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 1982, 21(12): 2229-2235.
- [25] 袁仁民, 曾宗泳, 马成胜, 等. 大气对流边界层光传输的实验室模拟[J]. 光学学报, 2001, 21(5): 518-521.
Yuan R M, Zeng Z Y, Ma C S, et al. Laboratory simulation of light propagation in atmospheric convective boundary layer[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(5): 518-521.
- [26] Yuan R M, Sun J N, Luo T, et al. Simulation study on light propagation in an anisotropic turbulence field of entrainment zone [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13427-13437.
- [27] Yuan R M, Sun J N, Luo T, et al. Simulation study on light propagation in an isotropic turbulence field of the mixed layer[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 7194-7209.
- [28] Nootz G, Matt S, Kanaev A, et al. Experimental and numerical study of underwater beam propagation in a Rayleigh-Bénard turbulence tank[J]. Applied Optics, 2017, 56(22): 6065-6072.
- [29] Rickenstorff C, Rodrigo J A, Alieva T. Programmable simulator for beam propagation in turbulent atmosphere[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 10000-10012.
- [30] DiComo G, Helle M, Peñano J, et al. Implementation of a long range, distributed-volume, continuously variable turbulence generator[J]. Applied Optics, 2016, 55(19): 5192-5197.
- [31] 张骏, 曾宗泳, 龚知本. 对流湍流池 Fried 相干长度的光学结构 [J]. 光学学报, 1996, 16(12): 1790-1795.
Zhang J, Zeng Z Y, Gong Z B. Optical structure of Fried's coherence length in the convective turbulent tank[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(12): 1790-1795.
- [32] 王英俭, 吴毅, 龚知本. 大气湍流相干长度和 Strehl 比的统计特征[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1109-1113.
Wang Y J, Wu Y, Gong Z B. The statistics of atmospheric coherence length and Strehl ratio[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1109-1113.
- [33] 饶瑞中. 湍流路径积分参量与湍流大气中光的传播效应[J]. 光学学报, 1997, 17(1): 79-85.
Rao R Z. Turbulence path integral parameters and light propagation effects in turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(1): 79-85.
- [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] Majumdar A K, DiUbaldo J A, Brown-VanHoozer A. Laboratory simulation of atmospheric turbulence for laser propagation: design and characterization[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3432: 50-56.
- [36] Yousefi M, Kashani F D, Aghajani A, et al. Experimental study of the effects of thermally induced optical turbulence on underwater wireless optical communication link parameters[J]. Journal of Optics, 2020, 22(2): 025702.
- [37] Ye Z W, Liu W J, Jiang W L, et al. Experimental investigation of polarization shift keying in underwater optical wireless communication under turbulence[C]//2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), October 20-22, 2021, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [38] Yuan R M, Wu X P, Luo T, et al. A review of water tank modeling of the convective atmospheric boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(10): 1099-1114.
- [39] Charnotskii M. Common omissions and misconceptions of wave propagation in turbulence: discussion[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012, 29(5): 711-721.
- [40] Nosov V V. Atmospheric turbulence in the anisotropic boundary layer[M]//Blaunstein N, Kopeika N. Optical waves and laser beams in the irregular atmosphere. Boca Raton: CRC Press, 2018.

Application of Laboratory Turbulence Simulator in Atmospheric Optics

Rao Ruizhong^{1*}, Yuan Renmin^{2**}

¹Key Laboratory for Atmospheric Optics, Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract

Significance Optical properties of atmospheric turbulence play an important role in atmospheric sciences, astronomy, and applications of optical engineering, such as adaptive optics, imaging, remote sensing, and optical communication in free space. Real atmospheric turbulence presents great spatial and temporal complexity. Practical light propagation experiments in a real atmosphere usually cost much and encounter many difficulties. Although these kinds of experiments have been carried out, it is usually difficult to obtain favorable results because of the non-homogenous and uncontrollable atmospheric conditions.

Thus, some controllable and size-limited atmospheric turbulence simulators in the laboratory have been built for light propagation effect study in scientific research and engineering applications. A typical laboratory turbulence simulator is a

tank or chamber of meter size filled with a turbulent medium under a heating mechanism. The turbulent medium is usually water or air. An unstable vertical temperature gradient is produced to simulate turbulence. Some instruments for status monitoring are used to measure the temperature, velocity, and turbulence strength. Adjusting the gradient can change the turbulence strength. These artificial turbulence simulators have been proven to be useful facilities.

Much work has been done on these turbulence simulators. For example, the relationship between the phase compensation efficiency of an adaptive optics system and the Fried parameter r_0 of simulated turbulence was obtained through experiments with such laboratory turbulence simulators. Some light propagation effects were investigated. However, there were few laws for light propagation effects based on the results of experiments on such simulators.

Progress With the development of light propagation and imaging in marine media, new optical engineering in earth environments, and special optical beam propagation in the atmosphere, artificial turbulence simulators are employed more widely. The experiments carried out in the simulated turbulent media can qualitatively or semi-quantitatively present light propagation effects similar to those effects in real atmospheric turbulence.

In many applications of optical engineering, the light propagation distance is several kilometers or even longer. In order to simulate the light propagation effects, the turbulence strength in the laboratory simulators must be much stronger than the real atmospheric turbulence. This requirement for turbulence strength has been fulfilled in most laboratory simulators. However, less attention has been paid to the similarity of spatial and temporal properties of the simulated turbulence with real atmospheric turbulence.

A favorable laboratory turbulence simulator with excellent performance should provide turbulence with stable properties that can be adjusted quantitatively. The properties of the simulated turbulence should be similar to those of the real atmospheric turbulence. The inertial range of turbulence should cover the scale range from millimeter to meter, and the temporal spectrum should cover a range from 0.1 Hz to 100 Hz or several kHz.

It must be reminded that only a small portion in the inner of the flow media of the simulator can present locally isotropic homogeneous turbulent status, and thus it is not suitable to employ propagation theory for a homogenous turbulent path to analyze the experimental results of these simulators.

Conclusions and Prospects More and more investigations on the optical properties of atmospheric turbulence at different places and time reveal that real atmospheric turbulence is very complicated, and in many cases, the real turbulence cannot be simply treated as locally homogenous and isotropic and described by Kolmogorov theory. It is very difficult in the laboratory to reliably simulate turbulence with properties of real atmospheric turbulence.

If we want to study light propagation effects quantitatively by using a simulator, we should design a simulator providing optical similarity with practical propagation conditions and obtain simultaneously detailed information about the structure of optical properties in the simulated turbulent media with the light propagation experiment. As more and more laboratory turbulence simulators are constructed, it is necessary to emphasize the physical similarity requirements. The first physical similarity is the fluidity similarity which concerns geometry, dynamics, Reynolds's number, etc. The second physical similarity is the light propagation condition. Some key spatial scales must be considered, including the scale of the light source, light wavelength, and propagation distance, the Fried parameter r_0 , and the inner and outer scales of turbulence. When these similarity requirements are fulfilled, the turbulence strength should be created high enough to achieve the most severe propagation condition characterized by the Rytov index.

In order to make more proper use of a laboratory turbulence simulator in the scientific study of atmospheric optics and the system design of optical engineering, the spatial and temporal properties of the laboratory turbulence simulator should be investigated in detail by both measurements and numerical simulation of the fluid field. On the basis of these investigations, better laboratory turbulence simulators with more suitable geometry can be designed and constructed.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; turbulence simulator