

光学学报

利用超声风速仪阵列估算近海面光学湍流强度

张昊镓^{1,2}, 孙刚^{1*}, 朱黎明^{1,2}, 张汉九^{1,3}, 马学宾^{1,2}, 胡晓丹^{1,2}, 张梓晗^{1,2}, 刘颖^{1,3}, 李学彬¹

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大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031

摘要 在中国南部热带海域, 基于超声风速仪阵列测量的大气三维风速可计算得到速度结构常数 C_v^2 , 结合折射率梯度可计算得到折射率结构常数 C_n^2 , 其中温度和湿度对 C_n^2 的影响是通过折射率梯度体现。将超声单点虚温估算方法的计算结果作为标定, 与本研究的超声风速仪阵列估算方法的 144 次计算结果进行相关性分析, 得到平均相关系数为 0.85, 最高可达 0.99, 最低为 0.71; 通过误差分析, 可得平均 $|\Delta \lg C_n^2|$ 为 0.3。研究表明: 超声风速仪阵列能够捕捉高频光学湍流效应的变化情况, 利用超声风速仪阵列估算近海面光学湍流强度可以从风速、湿度、温度等不同方面分析湍流效应, 实现在无人值守情况下对光学湍流的连续、长期的全天候观测。

关键词 大气光学; 光学湍流; 超声风速仪; 风速结构常数; 折射率结构常数

中图分类号 P183.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221007

1 引言

大气湍流主要是由太阳辐射和各种气象因素引起的空气密度的随机变化而形成的, 大气湍流的存在使得光波在大气中传输时受到折射率起伏的影响, 导致出现光强起伏、光束漂移、到达角起伏等各种效应, 从而引起光束相干性的退化, 严重降低了光束的质量, 这些效应对自由空间光通信、光电系统的设计、激光雷达等的应用具有重要影响, 通常用折射率结构常数 C_n^2 来度量光学湍流强度。在特殊的海洋环境下, 温湿度等变化引起的海上折射环境变化会导致光电系统出现“超折射”或“欠折射”现象, 在很大程度上影响目标的识别跟踪等光电工程的应用。因此, 对海洋区域大气边界层中湍流的特性及其规律进行深入研究, 精确地测量或估算出大气光学湍流强度信息可以用来指导自适应光学系统参数的设置, 从而大大减小湍流的影响, 改善光电系统的成像质量和性能, 进而使得系统满足工程实际应用。

若能用常规气象参数估算近地面光学湍流, 则可利用地域广、数据量多的常规气象资料, 获得在地域、气候等方面可靠的具有代表性的地区近地面光学湍流数据。青春等^[1]将超声虚温折射率结构常数计算方法与温度脉动测量方法进行对比, 证明超声虚温测量方法的正确性。吴晓庆等^[2-3]基于 Monin-Obukhov 相似理论估算近海面光学湍流强度, 表明 C_n^2 对温度梯度最敏感,

在大气处于不稳定条件下的白天, 相似理论估算方法得到的 C_n^2 与实测值基本一致, 但大气处于稳定条件下的夜晚相似理论估算方法得到的 C_n^2 与实测值相比被低估。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通过自主研发的温度脉动仪测量空间固定双点高频温差, 得到温度结构常数 C_T^2 , 用于进一步计算 C_n^2 , 这种方法只考虑温度对湍流的影响, 会导致光学湍流强度的次优估计, 特别是白天静止期^[4]。Fricke 等^[5]指出湿度扰动通过温度与湿度的相关扰动对大气折射率产生重要影响。马圣杰等^[6-7]通过闪烁测量和延时成像测量空气折射率微小闪烁(波动)等光学手段直接测量 C_n^2 , 但连续、高频、非常局部化的温度、湿度和风梯度点测量很难实现^[8]。同时, 有研究表明: 当适当消除大尺度折射率梯度时, 声波探测器的计算结果与闪烁计或差分图像运动等更直接的技术手段测得的光学湍流强度十分接近^[9]。

在中国南部热带海域, 近海面层作为海气物质能量交换和大多数光学活动的主区域, 使得南海近海面层光学湍流定量研究尤为重要。本研究通过中国南部热带海域塔基多层超声测量实验, 测量空气中 3 个方向的超声风速, 得到速度结构常数 C_v^2 , 结合温度和湿度等要素共同影响的折射率梯度计算得到 C_n^2 。通过对 144 d 原始数据进行分析处理和计算对比, 验证了超声风速仪阵列估算近海面光学湍流方法的可行性和可靠

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-06-15; 录用日期: 2022-07-01; 网络首发日期: 2022-07-11

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(29YZJJ2020QN2)

通信作者: *gsun@aiofm.ac.cn

性。本研究方法全面考虑温度、湿度和风速对计算结果的影响,更加充分捕捉产生光学湍流效应的物理现象,利用直接测量的原始数据进行计算分析,避免了受大气稳定度影响的经验公式选取的不确定性和不适用性,同时超声风速仪阵列具有探测时空分辨率高、自动化程度高等优点,大大提高了数据资料的连续性和可靠性,从而可以进行长期连续的全天候测量,有效地弥补了温度脉动仪使用人力成本高、对天气条件敏感的局限性。

2 实验概述和理论分析

2.1 实验概述

2020年10月本课题组利用超声风速仪和自动气

象站在中国南部热带海域开展大气光学参数测量实验,所有测量设备分层安装于高约20 m的气象塔上。主要测量设备CSAT-3B超声风速仪(Campbell Scientific公司)分别安装在距海洋下垫面4、6、10 m高铁塔的外伸约2 m的桅杆之上,测量三维风速和超声虚温,采样频率为20 Hz,水平方向传感器的两探头之间的距离为5 cm,垂直方向传感器的两探头之间的距离为10 cm,进行实时在线超声垂直路径上的风速校正;WXT536自动气象站安装在距海洋下垫面6 m处,测量大气压强、相对湿度(RH)以及环境温度等气象参数。实验场地和仪器设备详情见图1。

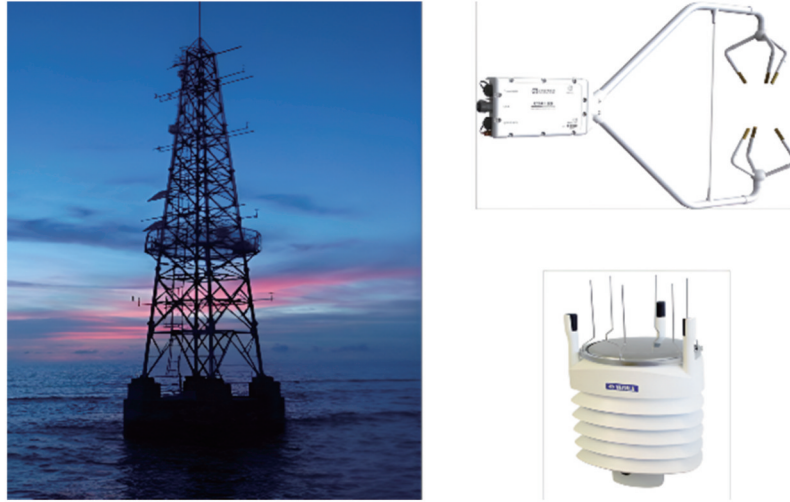


图1 实验场地和测量设备

Fig. 1 Experimental site and measurement equipment

测量设备详细指标见表1,其中 u 、 v 、 w 分别为主导风、纵向风和垂向风, T_s 为超声虚温, P 为气压, T 为环境温度。

表1 测量设备的主要指标

Table 1 Main indicators of measurement equipment

Instrument	Variable	Resolution	Range
CSAT3B	u	$1.0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$-32.8\text{--}32.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
	v	$1.0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$-32.8\text{--}32.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
	w	$0.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$-65.5\text{--}65.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
	T_s	$\pm 0.002 \text{ }^\circ\text{C}$	$-30\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$
WXT536	P	0.1 hPa	$600\text{--}1100 \text{ hPa}$
	T	$0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	$-52\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$
	RH	0.1%	$0\text{--}100\%$

2.2 利用超声风速仪阵列估算 C_n^2 的研究方法

根据大气折射率与温度、湿度和压力相关的波动关系,得到折射率结构常数 C_n^2 与位温结构常数 C_θ^2 、湿度结构常数 C_q^2 以及温湿相关项结构常数 $C_{\theta q}^2$ 间的关系式^[10]如下:

$$C_n^2 = (\partial n / \partial \theta)^2 C_\theta^2 + 2(\partial n / \partial \theta)(\partial n / \partial q) C_{\theta q}^2 + (\partial n / \partial q)^2 C_q^2, \quad (1)$$

式中: n 为大气折射率; q 为比湿; θ 为位温。

根据 Tatarskii 理论得到的速度结构常数 C_v^2 表达式^[11]如下:

$$C_v^2 = a^2 \left[K^2 / (\partial \langle U \rangle / \partial z)^2 \right]^{1/3} (\nabla \bar{v})^2, \quad (2)$$

式中: a 为常数; K 为湍流扩散系数; $\langle U \rangle$ 为平均速度; z 为高度; $\nabla \bar{v}$ 为散度。

结合 Tatarskii 虚位温结构常数 $C_{\theta_v}^2$, 进一步推导得到 C_n^2 为

$$C_n^2 = (\partial n / \partial \theta_v)^2 C_{\theta_v}^2 \approx a^2 (\partial n / \partial \theta_v)^2 \left[K^2 / (\partial \langle U \rangle / \partial z)^2 \right]^{1/3} (\nabla \langle \theta_v \rangle)^2, \quad (3)$$

式中: θ_v 为虚位温; $\nabla \langle \theta_v \rangle$ 可表示为

$$\nabla \langle \theta_v \rangle = \partial \theta_v / \partial z = (\partial n / \partial z) / (\partial n / \partial \theta_v). \quad (4)$$

能量耗散率 ϵ 与 K 的关系式为

$$\epsilon = K (\partial \langle U \rangle / \partial z)^2. \quad (5)$$

此外,速度结构常数 C_v^2 可以表示为

$$C_v^2 = 2\varepsilon^{2/3}. \quad (6)$$

根据文献[12],大气折射率与密度的关系如下:

$$n - 1 = a\rho, \quad (7)$$

$$n - 1 = \left[83.4212 + 24060.3 / (130 - 1/\lambda^2) + 159.97 / (38.9 - 1/\lambda^2) \right] \times 10^{-6}, \quad (8)$$

式中: ρ 是大气密度; λ 是光波长。

结合式(7)、(8),选取可见波长 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, $\rho = 0.225 \text{ kg/m}^3$,由此得到 $a = 0.227 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$,进而得到 z_1, z_2 高度的折射率梯度 $\nabla n_{z_1, z_2}$:

$$\nabla n_{z_1, z_2} = \bar{\rho} \partial a / \partial z + a \partial \rho / \partial z \approx a \partial \rho / \partial z \approx -(n - 1)(\partial T_v / \partial z + g / R_d) / \bar{T}_v, \quad (9)$$

式中: T_v 为空气虚温; $\bar{\rho}$ 为平均密度; \bar{T}_v 为平均虚温; g 为重力加速度; $R_d = 287.06 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 是干空气的气体常数。

为了确保一致性并保持梯度(即湍流混合)起因的湍流基本性质,去除主要的大尺度折射率梯度,利用决定 C_n^2 的折射率梯度中的高频(小尺度)波动,得到湍流折射率梯度的表达式为

$$\nabla n'_{z_1, z_2} \approx -(n - 1)(\partial T_v - \partial \bar{T}_v / \partial z) / \bar{T}_v. \quad (10)$$

将式(4)~(6)、(11)代入式(3)得

$$C_n^2 = 1.4 C_v^2 \left[\nabla \langle n' \rangle / (\partial \langle U \rangle / \partial z) \right]^2, \quad (11)$$

式中: $\nabla \langle n' \rangle = \partial n / \partial z$ 表示湍流折射率梯度的系综平均; $\partial \langle U \rangle / \partial z$ 表示风速波动垂直梯度的集合平均值。正如式(11)表示的那样, $\nabla \langle n' \rangle$ 反映了温度和湿度对折射率结构常数的影响,由此提出了以湍流速度梯度和波动为中心的湍流折射率结构常数表达式 C_n^2 。

2.3 根据超声单点虚温估算 C_n^2 的研究方法

在可见光和近红外波段,大气折射率起伏主要与温度起伏有关,因此折射率结构常数 C_n^2 可直接由温度结构常数 C_T^2 得到:

$$C_n^2 = (79 \times 10^{-6} P / T^2)^2 C_T^2. \quad (12)$$

超声风速仪是利用多普勒效应,通过声速与温度和湿度的函数关系测温的一种单点温度测量仪器,空气湿度和侧向风速会对超声虚温产生影响,而使用的设备已经对侧向风速进行实时校正,采用Schotanus修正方法对空气湿度的影响进行处理^[13]。

声速 c 与空气温湿度关系如下:

$$c^2 = \gamma P / \rho = \gamma R_d T_s = \gamma_d R_d T (1 + 0.319e/P), \quad (13)$$

式中: $\gamma = C_p / C_v$ 为湿空气的质量定压热容与质量定容热容之比, C_p, C_v 分别为质量定压热容和质量定容热容; $\gamma_d \approx 1.4, \gamma_d R_d \approx 403 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}; e$ 为水汽压。

由式(13)得到的超声虚温 T_s 和空气虚温 T_v 的表达式如下:

$$T_s = c^2 / (\gamma_d R_d) = T (1 + 0.317e/P) = T (1 + 0.51q), \quad (14)$$

$$T_v = c^2 / (\gamma R_d) = T (1 + 0.378e/P) = T (1 + 0.61q), \quad (15)$$

式中: $q \approx 0.622e/P$ 。

由式(14)、(15)得出:直接测得的 T_s 中含有湿度信息,且 $T_s \approx T_v$,这从物理公式上不仅解释了超声风速仪阵列估算方法中将空气虚温和超声虚温等价直接代入计算的可行性,而且表明需要对 T_s 进行湿度订正,从而获得 T 。

3 数据处理和结果分析

3.1 超声风速仪数据处理

从2021年1月29日至2021年7月21日进行连续的观测实验,共计174 d。以 C_n^2 的1 d估算作为一次运行,针对观测期间得到的连续实测原始数据,选取良好的天气条件进行逐天编号,其他异常天气情况及影响将在接下来的工作中进行单独分析。

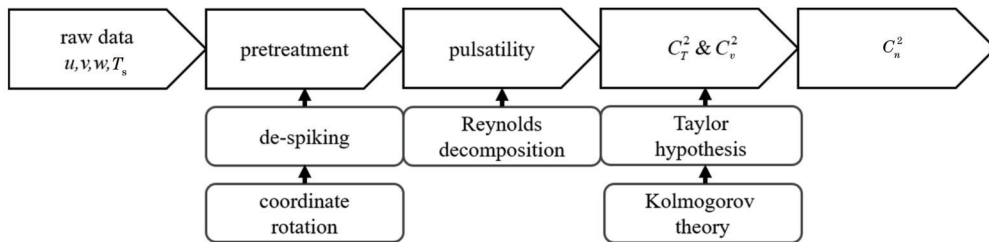


图 2 超声数据处理过程

Fig. 2 Ultrasonic data processing process

超声数据处理过程如图2所示。超声数据预处理过程首先是将超出物理极限范围、降雨前后1 h和降水期间、异常标志diag不为0的数据剔除,在本研究中不予分析。异常值剔除是应用标准差法,以3倍标准差为阈值,大于阈值的数据将被判定为异常值,将其剔除^[14],若该样本中判定为异常的值大于10%的样本总量,则整段剔除。坐标旋转是校正由于地形倾斜、起伏

和仪器的非绝对水平安装等对垂直风速观测的影响,使用二次坐标旋转法(DR),最终得到并使用这样一个坐标系,其中 u 表示横向风速, v 表示垂直风速, w 表示纵向风速;进一步通过雷诺平均得到反映湍流状况的三维风速和虚温脉动量,这个过程选择平均时间过短,则不满足各态历性,使结构常数的统计结果被低估,选择平均时间过长会将变化特征进行平滑,使结果被高

估。根据 Ogive 函数^[15]表示的协谱从高频到低频的积分,选取 30 min 平均时间;利用 2/3 次幂律计算结构函数的理论基础是 Kolmogorov 局地各向同性,“局地”一词可以理解为各向同性仅在惯性和耗散范围内^[16]。在超声风速仪直接测量数据的情况下选择谱比法^[17],此方法对测量空间和流动的不均匀性不敏感,观测范围广、效果好^[18],通过谱比值 $F_{v,v}(k_1)/F_{u,u}(k_1) = F_{w,w}(k_1)/F_{u,u}(k_1) = 4/3$ [其中 $F_{v,v}(k_1)$ 为 v 方向二阶速度谱, $F_{u,u}(k_1)$ 为 u 方向二阶速度谱, $F_{w,w}(k_1)$ 为 w 方向二阶速度谱,反映湍流各向同性情况^[19];利用时间变化物理量代替空间变化物理量的计算过程的理论基础是 Taylor“冻结”假设,即当脉动量远小于平均量,湍流场可看作以平均速度平移^[20],假设的成立与风速大小、方向和湍流强度等直接相关,但目前其适用性没有精确的普适范围。根据 Lin^[21]的理论推导得到的 Taylor“冻结”假设的数学本质是 Navier-Stokes 方程的一阶线性近似,其假设条件概括为:有主流方向、湍流强度低和平均剪切小。

3.2 不同计算方法的结果对比情况

3.2.1 C_n^2 日变化分析

利用超声风速仪阵列估算方法和超声单点虚温估

算方法分别计算折射率结构常数 C_n^2 ,图 3 给出 2021 年 5 月 1 日 (Run. 84) 至 2021 年 5 月 3 日 (Run. 86) 的结果对比,0 时刻表示 Run. 84 这天的 0 时刻,之后每 4 h 为一个刻度至 Run. 86 的 24 时刻。这期间天气晴朗,平均气温为 28.6 °C,平均温度梯度较大,为 -2.3 °C,风速较为稳定,平均风速为 2.3 m/s,为西北海风,风剪切较小,平均为 0.4 m/s,径向、纬向、垂向的平均湍流强度分别为 0.23、0.18、0.11,详见图 4、5。

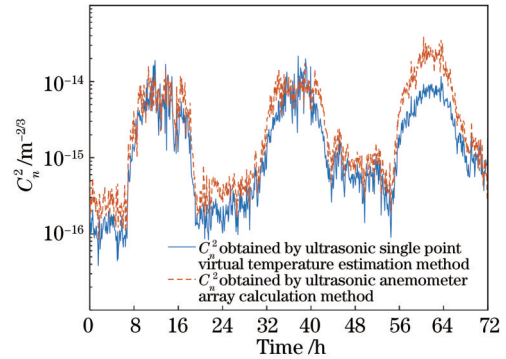


图 3 C_n^2 对比图
Fig. 3 C_n^2 comparison

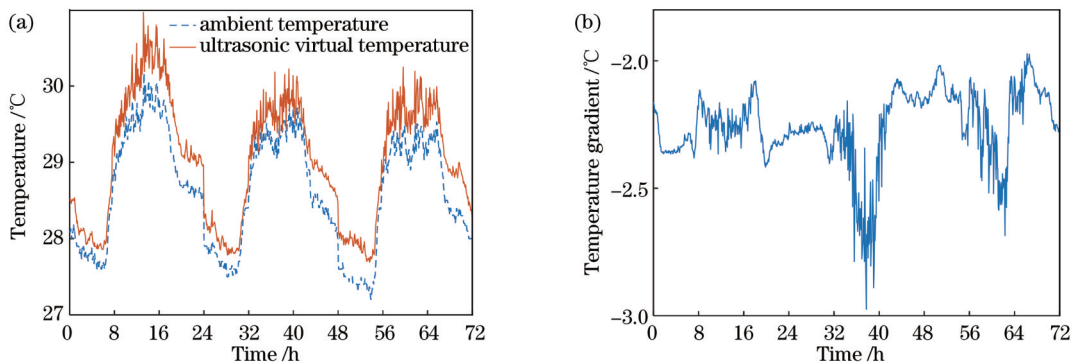


图 4 温度和温度梯度变化图。(a)温度变化图;(b)温度梯度变化图

Fig. 4 Temperature change and temperature gradient change. (a) Temperature change; (b) temperature gradient change

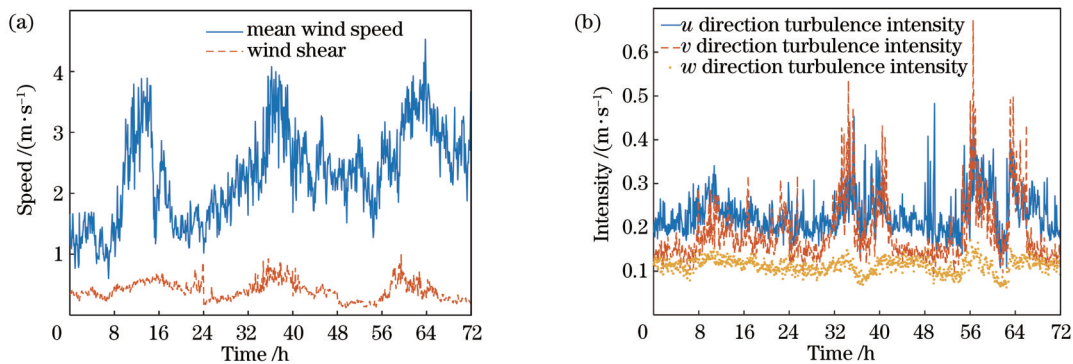


图 5 风速和风切变化图及湍流强度变化图。(a)风速和风切变化图;(b)湍流强度变化图

Fig. 5 Wind speed, wind shear change, and turbulence intensity change. (a) Wind speed and wind shear change; (b) turbulence intensity change

大气光学湍流平均强度在 $10^{-16} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 之间, C_n^2 日变化呈现“墨西哥帽”式的变化趋势, 相比于陆地下垫面没有明显“转换时刻”。在观测期间, 白天 C_n^2 较大时段两种方法的结果基本一致, 晚上 C_n^2 较小时段实线的超声风速仪阵列估算方法略高于超声单点虚温估算方法, 但在 Run. 86 这天出现的情况相反, 夜间基本相同, 白天超声风速仪阵列估算结果偏大。超声风速仪阵列估算方法和超声单点虚温估算方法的相关性分析见图 6, 其中 Spearman 相关系数 (R) 达到 0.96113, 通过最小二乘法线性拟合, 得到拟合斜率为 0.95096, 截距为 0.48645。图 6 横坐标表示超声单点虚温估算方法的结果, 纵坐标表示超声风速仪阵列估

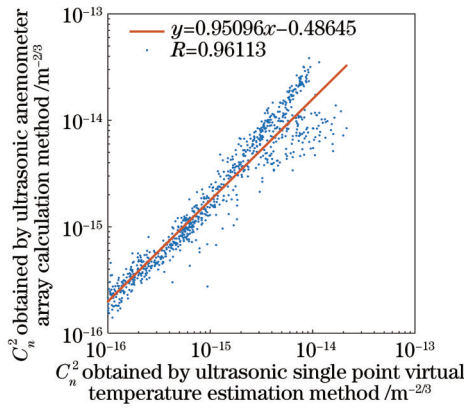


图 6 C_n^2 相关性图

Fig. 6 C_n^2 correlation diagram

算方法的结果, 结果表明两种方法均能够反映真实大气中的湍流日变化情况, 虽然部分时刻超声风速仪阵列估算方法的结果相比超声虚温估算方法偏大, 二者一致性也略有波动, 但趋势一致, 相关性高, 证明了超声风速仪阵列估算折射率结构常数 C_n^2 的可行性。

3.2.2 C_n^2 月变化分析

观测地属于热带海洋季风区, 其基本气候特征是: 高温高湿、对流旺盛、降水较多、干湿季分明、长夏无冬, 由于海洋的调节作用, 年平均最高气温只有 29°C 左右, 四季界限不明显, 只有干、湿两季之别, 其中 2—5 月为少雨期干季, 6、7 月为多雨期湿季。受季风环流的影响, 6、7 月台风旺盛, 2、3 月基本无风, 年平均风速为 5.5 m/s 。尽管整个实验期间获取了几个月的数据, 且在接下来的分析中所有结论都基于这 144 次运行, 但这里仅详细展示了每个月具有代表性的运行的详细数据, 只是为了提供有关各种行为的一些代表性信息以探究超声风速仪阵列估算方法在不同条件下的可行性, 综合结果得到两种不同方法的计算结果的相关性很高, 平均相关系数达到 0.85, 表明二者在变化趋势上一致性高。 $|\Delta \lg(C_n^2)|$ 指两种估算结果 C_n^2 的大小差异, 平均值为 0.3, 这是一个相对较小的值, 表明两种方法的计算结果近似相等。5 次典型运行的两种方法结果比较见表 2, 其中 $C_{T_n}^2$ 、 $C_{v_n}^2$ 表示超声风速仪阵列估算结果, $C_{T_n}^2$ 、 $C_{v_n}^2$ 表示超声单点虚温估算结果。

表 2 5 次典型运行的两种方法结果比较

Table 2 Comparison of results of two calculation methods for five typical runs

Run number	Run. 20 (February 20, 2021)	Run. 47 (March 30, 2021)	Run. 80 (April 27, 2021)	Run. 87 (May 3, 2021)	Run. 120 (June 16, 2021)
$C_{T_n}^2 \cdot C_{v_n}^2 / (10^{-16} \text{ m}^{-2/3})$	25.3	9.38	9.59	15.8	21.2
$C_{v_n}^2 \cdot C_{T_n}^2 / (10^{-16} \text{ m}^{-2/3})$	2.54	10.7	15.7	30.6	8.14
$ \Delta \lg C_n^2 $	0.98	0.06	0.21	0.29	0.41
R	0.84	0.86	0.96	0.98	0.71

3.2.3 C_n^2 不同稳定条件变化分析

由 Run. 80 的大气稳定性判据 z/L (L 为 Obukhov 长度) 来看, 7:00—20:00 大气处于不稳定层结, 此次运行的其余夜间时刻大气处于稳定层结, 具体见图 7。在图 8 所示的折射率结构常数 C_n^2 随稳定性判据 z/L 的变化图中, $z/L < 0$ 的不稳定条件和 $z/L > 0$ 的稳定条件下 C_n^2 均随 $|z/L|$ 的增大而增大, 且不稳定条件下的 C_n^2 比稳定条件下的 C_n^2 更大, 离散性也更高。值得注意的是, 在 $|z/L| < 0.01$ 的近中性层结条件下, C_n^2 的值最小, 星号表示的超声风速仪阵列估算 C_n^2 明显整体高于圆圈表示的超声单点虚温估算 C_n^2 , 进一步体现了添加动力因子影响的超声风速仪阵列估算方法在不同气象

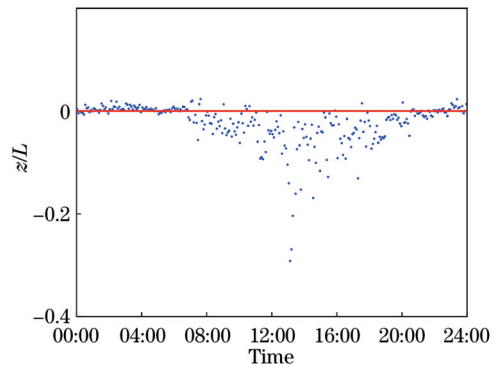


图 7 z/L 的时间变化图

Fig. 7 z/L varying with time

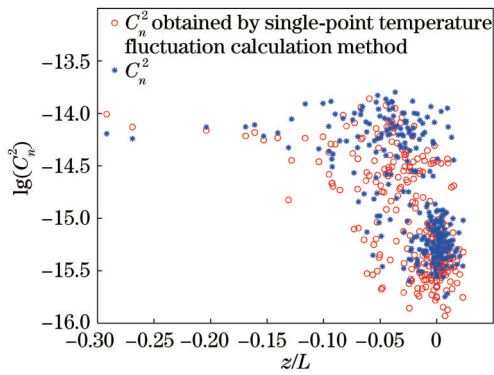


图 8 z/L 随 C_n^2 的变化图
Fig. 8 C_n^2 varying with z/L

条件下的全面和准确性。这种现象可能是由于在中性层结下,热力湍流发展不充分,湍流运动更多取决于动力因子。

3.2.4 C_n^2 不同气象条件变化分析

表 3 为 6 种影响参数对 C_n^2 计算结果的相关性分

表 3 Run. 80 折射率结构常数 C_n^2 与气象参数的相关性
Table 3 Correlation between C_n^2 and meteorological parameters of Run. 80

Meteorological parameter		$T_s / ^\circ\text{C}$	$\Delta T / ^\circ\text{C}$	RH / %	$U / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S / s^{-1}	$C_n^2 / \text{m}^{-2/3}$
C_n^2 obtained by ultrasonic anemometer array calculation method	Whole day on April 27	0.75	0.50	-0.83	0.18	0.44	-0.04
	Daytime on April 27	0.83	-0.11	-0.81	0.16	0.23	0.10
	Night on April 27	-0.44	-0.41	-0.21	0.81	0.80	0.89
C_n^2 obtained by ultrasonic single point virtual temperature estimation method	Whole day on April 27	0.71	0.38	-0.81	0.25	0.55	0.98
	Daytime on April 27	0.91	-0.22	-0.82	0.06	0.28	0.98
	Night on April 27	-0.56	-0.55	-0.29	0.94	0.93	0.98

4 结 论

测量空气中三个方向的超声风速并据此导出速度结构常数 C_n^2 , 结合温度和湿度等要素共同影响的折射率梯度, 计算得到以湍流速度梯度和波动为中心的高频光学湍流效应的变化情况。超声风速仪阵列估算方法通过测量的气象参数直接进行计算, 避免了选取经验公式估算光学湍流的不确定性和不适用性; 该方法考虑温湿和风速的综合影响, 避免了仅考虑温度影响的次优估计, 同时能够实现在无人值守情况下对光学湍流的连续、长期的全天候观测, 降低人力成本。通过研究取得以下结论:

1) 通过超声风速仪阵列估算方法与超声单点虚温估算方法计算结果的相关性和线性拟合的研究分析, 得到平均相关系数达到 0.85, 平均 $|\Delta \lg(C_n^2)|$ 为 0.3, 验证了超声风速仪阵列估算方法的可行性。

2) 通过影响因子分析研究, 得到两种方法夜间与温度相关参量的相关性相比于白天平均降低 68%, 而与风速相关参量的相关性平均上升 59%。这表明全天虚温对计算结果产生主要影响, 其中湿度是通过影

析, 影响参数依次是超声虚温 T_s 、温度梯度 ΔT 、相对湿度 RH、平均风速 U 、风剪切 S 和结构常数 C_v^2 、 C_T^2 。从表 3 中可以看出: 全天超声单点虚温估算结果与 C_T^2 的相关性较高, 其相关系数为 0.98, 与湿度的相关系数为 0.8, 与虚温的相关系数为 0.7, 与风剪切的相关系数为 0.6, 而超声风速仪阵列的估算结果与 C_v^2 的相关性极低, 相关系数接近 0, 与湿度的相关性为 0.8, 与虚温的相关系数为 0.8, 与温度梯度的相关系数为 0.5, 与风剪切的相关系数为 0.4。总的来说, 全天虚温对计算结果产生主要影响, 其中湿度是通过影响超声虚温来影响结果, 动力因子对计算结果的影响也不可忽视, 进一步体现了超声风速仪阵列估算的全面性和优越性。值得注意的是, 折射率结构常数夜间与温度的相关参量(超声虚温、温度梯度和相对湿度)的相关性相比于白天更低, 且夜间呈负相关, 而与动力因子参量(平均风速、风切变)的相关性显著增大。

响超声虚温来进一步影响结果, 速度相关量如平均风速、风剪切对计算结果的影响也不可忽视, 特别是大气稳定时期, 从而进一步验证在夜间稳定情况以速度波动为中心的超声风速仪阵列估算方法的优越性。

虽然大多数情况下两种方法所得结果的一致性很高, 但部分时刻仍存在不同, 有时甚至会出现超声风速仪阵列计算结果小于超声单点虚温计算结果, 出现这种情况的原因可能有: 很难满足传播路径上湍流均匀性假设、Taylor“冻结”假设等条件, 无法将实验结果与理论分析结果进行严格意义上的对比; 海面环境复杂, 对海浪、辐射等多方面影响因素考虑不全面; 各种气象要素的交叉影响, 可能存在相互促进或抵消, 或一种因素主导其他影响微弱的因素等不同状况。接下来的工作中将从不同影响因素如风向、风速、温度等控制变量情况详细进行原因分析。

参 考 文 献

[1] 青春, 吴晓庆, 王海涛, 等. 成都地区近地面大气折射率结构常数的统计分析[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(5): 368-375.
Qing C, Wu X Q, Wang H T, et al. Statistical analysis of surface layer atmosphere refractive index structure parameter in

- Chengdu[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(5): 368-375.
- [2] 吴晓庆, 朱行听, 黄宏华, 等. 基于 Monin-Obukhov 相似理论估算近地面光学湍流强度[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0701004. Wu X Q, Zhu X T, Huang H H, et al. Optical turbulence of atmospheric surface layer estimated based on the Monin-Obukhov similarity theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701004.
- [3] Davidson K L, Schacher G E, Fairall C W, et al. Verification of the bulk method for calculating overwater optical turbulence[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(17): 2919-2924.
- [4] 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响[J]. *光学学报*, 2004, 24(5): 592-596. Sun G, Weng N Q, Xiao L M, et al. Profile and character of atmospheric temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 592-596.
- [5] Friehe C A, La Rue J C, Champagne F H, et al. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, 65(12): 1502-1511.
- [6] 马圣杰, 郝士琦, 赵青松. 基于改进型 SPGD 算法的涡旋光波前畸变校正[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0601001. Ma S J, Hao S Q, Zhao Q S. Wavefront distortion correction of vortex beam based on improved SPGD algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0601001.
- [7] Bose-Pillai S, Wilson B, McCrae J, et al. Profiling of atmospheric turbulence from dual-camera time-lapse imagery of a LED array[C]//*Optical Sensors and Sensing Congress*, June 22-26, 2020, Washington, D. C. Washington, D. C.: OSA, 2020: PTu4F.2.
- [8] Ward H C. Scintillometry in urban and complex environments: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(6): 064005.
- [9] Fiorino S, Bose-Pillai S, Keefer K. Re-visiting acoustic sounding to advance the measurement of optical turbulence[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7658.
- [10] Hill R J. Spectra of fluctuations in refractivity, temperature, humidity, and the temperature-humidity cospectrum in the inertial and dissipation ranges[J]. *Radio Science*, 1978, 13(6): 953-961.
- [11] Tatarskii V I. *Wave propagation in turbulent medium*[M]. New York: Dover Publications, 1961.
- [12] Edlén B. The refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1966, 2(2): 71-80.
- [13] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 26(1): 81-93.
- [14] Nosov V, Lukin V, Nosov E, et al. Measurement of atmospheric turbulence characteristics by the ultrasonic anemometers and the calibration processes[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(8): 460.
- [15] Berger B W, Davis K J, Yi C, et al. Long-term carbon dioxide fluxes from a very tall tower in a northern forest: flux measurement methodology[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(4): 529-542.
- [16] Kolmogorov A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1941, 30: 301-305.
- [17] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [18] Kaimal J C, Wyngaard J C, Haugen D A, et al. Turbulence structure in the convective boundary layer[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1976, 33(11): 2152-2169.
- [19] Chamecki M, Dias N L. The local isotropy hypothesis and the turbulent kinetic energy dissipation rate in the atmospheric surface layer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, 130(603): 2733-2752.
- [20] Wyngaard J C, Clifford S F. Taylor's hypothesis and high-frequency turbulence spectra[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, 34(6): 922-929.
- [21] Lin C C. On Taylor's hypothesis and the acceleration terms in the Navier-Stokes equation[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1953, 10(4): 295-306.

Estimation of Optical Turbulence Intensity near Sea Surface Using Ultrasonic Anemometer Array

Zhang Haojia^{1,2}, Sun Gang^{1*}, Zhu Liming^{1,2}, Zhang Hanjiu^{1,3}, Ma Xuebin^{1,2}, Hu Xiaodan^{1,2}, Zhang Zihan^{1,2}, Liu Ying^{1,3}, Li Xuebin¹

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

²Science Island Branch of Graduates School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract

Objective The characteristics and laws of atmospheric turbulence in the atmospheric boundary layer over the ocean region are studied, which can be employed to guide the parameter setting of the adaptive optical system. Therefore, the influence of turbulence is greatly reduced, and the imaging quality and the performance of the photoelectric system are improved to meet the engineering application. In this method, the effects of temperature, humidity, and wind velocity on

the calculation results are fully considered, and the physical phenomena that produce optical turbulence effects are fully captured. Additionally, the ultrasonic anemometer array has the advantages of high spatial and temporal resolution and high automation degree, which greatly improves data continuity and reliability. Finally, continuous all-weather measurement can be carried out for a long time, and the limitation of high labor costs and sensitivity to weather conditions is effectively compensated.

Methods Based on the multi-layer ultrasonic measurement experiment in the tropical South China Sea, the ultrasonic wind velocity in three directions in the air is measured, and the velocity structure constant is obtained. In addition, the refractive index structure constant is calculated by combining the refractive index gradient affected by temperature and humidity. Firstly, according to the fluctuation relations of atmospheric refractive index with temperature, humidity, and pressure, the relationships of refractive index structure constant with potential temperature structure constant, humidity structure constant, and temperature-humidity correlation structure constant are obtained. At the same time, the velocity structure constant obtained from Tatarskii theory and the relationship between the energy dissipation rate and the velocity structure constant are discussed. Secondly, based on the relationship between atmospheric refractive index and density, the major large-scale refractive index gradients are removed to ensure consistency and maintain the basic properties of the gradient origin, i. e., turbulent mixing. The expression of the turbulent refractive index gradient is obtained through the high frequency (small scale) fluctuation in the refractive index gradient which determines the refractive index structure constant.

Results and Discussions 1) This paper verifies the feasibility and reliability of the method by analyzing and comparing the 144-day raw data (Fig. 3). The correlation analysis between the ultrasonic anemometer array calculation method and the ultrasonic single point virtual temperature estimation method is shown in Fig. 6. The Spearman correlation coefficient (R) reaches 0.96113; a fitting slope of 0.95096 is obtained through the least squares linear fitting, and the intercept is 0.48645. The results of the ultrasonic single point virtual temperature estimation method and the ultrasonic anemometer array calculation method are shown in the horizontal and vertical coordinates respectively. The results indicate that both methods can reflect the daily variation of turbulence in the real atmosphere. The result of the ultrasonic anemometer array estimation method at some time is larger than that of the ultrasonic single point virtual temperature estimation method, and the consistency of the two methods also fluctuates slightly. However, the trend is the same with high correlation, which proves the feasibility of the method to estimate the refractive index structure constant of the ultrasonic anemometer array estimation method. 2) The effects of temperature, humidity, and wind velocity on the calculation results are fully considered, and the physical phenomena that produce the optical turbulence effect are fully captured (Table 3). The correlation coefficients between the estimated temperature and the temperature structure constant are 0.98, 0.8, 0.7, and 0.6, respectively. However, the correlation between the estimated results of the ultrasonic anemometer array and the velocity structure is very low, and the correlation coefficient is close to 0. The correlation coefficients with relative humidity, virtual temperature, temperature gradient, and wind shear are 0.8, 0.8, 0.5, and 0.4, respectively. In conclusion, the all-day virtual temperature exerts a major influence on the calculation results, in which the humidity affects the results by affecting the ultrasonic virtual temperature. In addition, the influence of the dynamic factors on the calculation results cannot be ignored, and it further shows the comprehensiveness and superiority of the estimation method of the ultrasonic anemometer. Notably, the dependence of the refractive index structure constant on temperature-related parameters such as ultrasonic virtual temperature, temperature gradient, and relative humidity is lower at night than during the day and is negatively correlated at night. The correlation with the average wind velocity and wind shear of the dynamic factor parameters increases significantly.

Conclusions 1) The correlation analysis shows that the average correlation coefficient is 0.85 with the highest value of 0.99 and the lowest value of 0.71, which is compared with the 174-day results of the ultrasonic anemometer array. By error analysis, the average $|\Delta \lg C_n^2|$ is 0.3. 2) Through the analysis of the influence factors of the two estimation methods at night, the correlation between the refractive index structure constant and the temperature-related parameters decreases by 68% on average, and the correlation between the refractive index structure constant and the wind speed-related parameters increases by 59% on average.

Key words atmospheric optics; optical turbulence; ultrasonic anemometer; wind velocity structure constant; refractive index structure constant