

近海面大气折射率结构常数统计特性分析

吴晓军^{1,2} 王红星^{1,2} 李笔锋^{1,2} 刘传辉^{1,2}

¹海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001

²山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001

摘要 大气折射率结构常数(C_n^2)是衡量湍流强度的重要物理量之一。利用大孔径闪烁仪对烟台地区近海面环境下2014年1~6月份的大气折射率结构常数进行了测量,对实测数据进行频率计数、日变化以及月变化统计特性分析,并与其他地理环境下的 C_n^2 值变化特征进行对比。统计分析对比结果表明:近海平面 C_n^2 值主要集中在 10^{-17} ~ 10^{-14} $m^{-2/3}$ 范围内,属于典型的中等偏弱湍流范畴;不同时间段的 C_n^2 值没有呈现出其他环境常见的“转换时刻”变化特征,且夜晚与白天的 C_n^2 值无明显差别,日均值在 10^{-16} ~ 10^{-14} $m^{-2/3}$ 范围内变化,同时结合标准差对测试期间 C_n^2 数据的离散程度进行了详细的分析。

关键词 大气光学;大气湍流;近海面环境;闪烁仪;折射率结构常数;统计特性

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0401002

Statistical Analysis of Atmospheric Refractive Index Structure Parameter Under the Sea Surface Environment

Wu Xiaojun^{1,2} Wang Hongxing^{1,2} Li Bifeng^{1,2} Liu Chuanhui^{1,2}

¹Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

²Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract Atmospheric refractive index structure parameter (C_n^2) is one of the important physical quantities measuring the degree of turbulence. The refractive index structure parameter under the sea surface environment in Yantai region from January to June in 2014 is measured by using a large aperture scintillometer. The statistical properties of measured data are analyzed, including frequency count, daily variation and monthly variation. The change characteristics of C_n^2 under the sea surface are compared with other environments. The comparative analysis result reveals that the value of C_n^2 varies between 10^{-17} $m^{-2/3}$ to 10^{-14} $m^{-2/3}$ under the sea surface environment, which is classified as medium and weak turbulence. The C_n^2 at different times are not presented the variable characteristics of “conversion time”, and there are no significant differences between C_n^2 in the daytime and C_n^2 at night. The daily mean vary between 10^{-16} $m^{-2/3}$ to 10^{-14} $m^{-2/3}$. At the same time, the discrete degree of C_n^2 is analyzed combining standard deviation.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; sea surface environment; scintillometer; refractive index structure parameter; statistical property

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.3310

收稿日期: 2014-10-10; 收到修改稿日期: 2014-12-03

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费、山东省自然科学基金(ZR2013FQ010)

作者简介: 吴晓军(1984—),男,博士研究生,助理工程师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: 195358836@qq.com

导师简介: 王红星(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: 13371368601@cumail.com

1 引 言

当激光在湍流大气中传输时,折射率的随机起伏严重破坏了光波的相干性,进而引起光强闪烁、光束漂移以及光斑扩展等效应,这对许多光学工程诸如激光大气传输、无线光通信等带来了严重影响^[1-6]。大气折射率结构常数 C_n^2 在光传播问题研究中上扮演着十分重要的角色,是大气光学中的基本参数之一。由于大气本身随时间与空间不断地变化,使得 C_n^2 具有较强的随机性^[7],因此,通过开展局地条件下的大气折射率结构常数 C_n^2 的测量及分析工作,有利于对不同地理环境下的湍流变化特征进行准确把握,同时为客观评估大气对激光应用工程的影响提供数据支撑。

针对一些特定的地理环境,国内外已经开展了许多有关 C_n^2 的实际测量工作。2006年,长春理工大学的陈纯毅等^[8]在城市环境下进行了600 m激光传输静态测试,对激光的光强和到达角起伏进行了为期一天的测量,然后据此计算出大气折射率结构常数,发现 C_n^2 在白天的数值较大,夜晚和早晨存在较小值,并指出城市环境下大气湍流绝大部分集中在强湍流区区域,测试的结果为在进行野外激光通信合理地选择试验时间提供了依据。2013年,中国科学院安徽光学精密机械研究所的吕炜煜等^[9]利用温度脉动仪对我国闽西山区10~12月秋冬季的大气折射率结构常数进行采集,将其统计特性与合肥地区以及北方干旱地区 C_n^2 的变化特征对比,发现它们之间存在明显差异。闽西山区的大气湍流属于中等偏弱湍流,并且在早晨只存在一个“转换时刻”;合肥和北方干旱地区的大气湍流主要以中等偏强湍流为主,并且在早晨和傍晚存在两个“转换时刻”,为大气湍流对激光工程的影响提供了基础数据。2012年,封双连等^[9]同样使用温度脉动仪对新疆库车地区的戈壁滩进行了为期8个月的大气折射率结构常数测量,并对大气湍流强弱时段进行了统计,发现戈壁地区的大气湍流主要以强湍流为主,为光电系统选择合适的工作时段提供了重要参考。此外,美国的Andreas等^[10-12]针对沙漠、雪地、冰面等特殊环境下的大气折射率结构常数也进行了实际测量,其目的都是发现上述特定环境下的 C_n^2 所具备的特点,进而为研究大气湍流对激光应用工程的影响奠定基础。

不同环境下的大气折射率结构常数的测量工作已经得到了广泛的关注,但是受到测试条件的限制,针对近海面环境下 C_n^2 的长期测量工作在国内外鲜有报道。此外,以上所介绍的大气折射率结构常数测试所使用的仪器大多采用温度脉动仪,对于近海面环境下一定路径长度的激光传输而言,采用闪烁法测量得到路径上 C_n^2 的平均值,更加符合研究该环境下大气折射率结构常数变化特征的实际需求。

本文利用大孔径闪烁仪对烟台地区近海面环境下2014年1~6月份的大气折射率结构常数进行了长期测量,通过对实测数据进行频率计数、日变化以及月变化统计特性分析,并将结果与其他地理环境下的 C_n^2 值变化特征进行对比,得出了近海面大气折射率结构常数的变化特点。

2 测试仪器与链路设置

测试场地位于烟台地区近海面,仪器采用德国Scintec公司生产的BLS450大孔径闪烁仪,其关键技术参数如表1所示。发射端架设在烟台山公园灯塔顶部,海拔高度约为64 m,接收端架设在烟台山15层综合楼楼顶,海拔高度约为62 m,因此可以将该路径近似看作水平测试链路,测试链路横跨第一海水浴场附近海域,传输距离大约为2.56 km,其正下方78%左右为近海面环境,其测试路径示意图和实际场景图分别如图1和图2所示。

表1 BLS450闪烁仪的关键技术参数

Table 1 Specifications of BLS450 scintillometer

Transmitter		Receiver	
Laser	GaAlAs	Detectors	Plan convex
Wavelength /nm	880	Lens	Plan convex
Beam divergence /($^{\circ}$)	16	Focal length /mm	450
Pulse length /ms	8	Diameter /cm	15
Modulation frequency /Hz	1750	Field of view /mrad	8
Optical power /W	7.5		

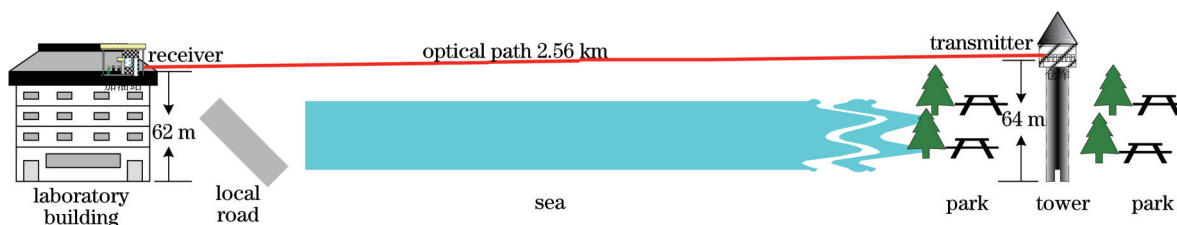


图1 测试链路示意图

Fig.1 Schematic of the experimental optical path



图2 测试链路实际场景图(数据来源于Goole.com)

Fig.2 Aerial photo of the laser propagation path (data from Goole.com)

闪烁法测量大气折射率结构常数的基本原理是首先测得光强的均值 $\langle I \rangle$ 与标准差 s , 然后代入公式

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{4} \ln \left[1 + \left(\frac{s}{\langle I \rangle} \right)^2 \right]$$

得出对数幅度方差, 最后根据大气折射率结构常数 C_n^2 与对数幅度方差 σ_x^2 、链路长度 L 以及孔径尺寸 D 之间的关系 $C_n^2 = 4.48D^{7/3}L^{-3}\sigma_x^2$ 反演得到最终结果, 关于闪烁法测量 C_n^2 的详细过程可以参考文献[13-15]。

目前, 根据大气折射率结构常数 C_n^2 区分湍流强弱普遍采用的方法是 Davis 不等式, 本文将根据此方法对观测期间近海面大气湍流强度进行划分, 其具体表达式为^[16]

$$\begin{aligned} \text{Strong turbulence: } & C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}, \\ \text{Moderate turbulence: } & 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}, \\ \text{Weak turbulence: } & C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}. \end{aligned} \quad (1)$$

3 测试结果分析

BLS450 闪烁仪每隔 1 min 记录一次大气折射率结构常数。在扣除了个别时段出现雨、雪、雾等特殊天气时闪烁仪的失效数据, 以及 2014 年 1 月 1~8 日、3 月 2 日、4 月 12~13 日、4 月 22 日~5 月 1 日、5 月 17~18 日、6 月 15~17 日期间的数据后, 1~6 月采集的 C_n^2 样本容量情况分别如下: 1 月为 30416 个, 2 月为 38422 个, 3 月为 40808 个, 4 月为 21164 个, 5 月为 37289 个, 6 月为 34536 个。上述数据除 4 月涵盖 19 天外, 其余每个月的数据采集时间不少于 20 天。

下面对测试期间所有采集到的大气折射率结构常数数据样本分别进行频数统计、日变化特征分析以及月变化特征分析。

3.1 大气折射率结构常数频数统计

将测试期间大气折射率结构常数所分布的数值区间按一定间隔分成若干子区间, 统计在各子区间内该量级 C_n^2 出现频数的多少, 可以掌握各种量级折射率结构常数出现的概率, 该方法有助于对整个测试期

间的大气湍流强度进行划分^[8]。通过对不同月份 C_n^2 数据样本进行频数统计,得到了不同区间段 C_n^2 分布直方图,统计结果如图3所示,同时图中还标注出了各个月份的平均 C_n^2 大小。

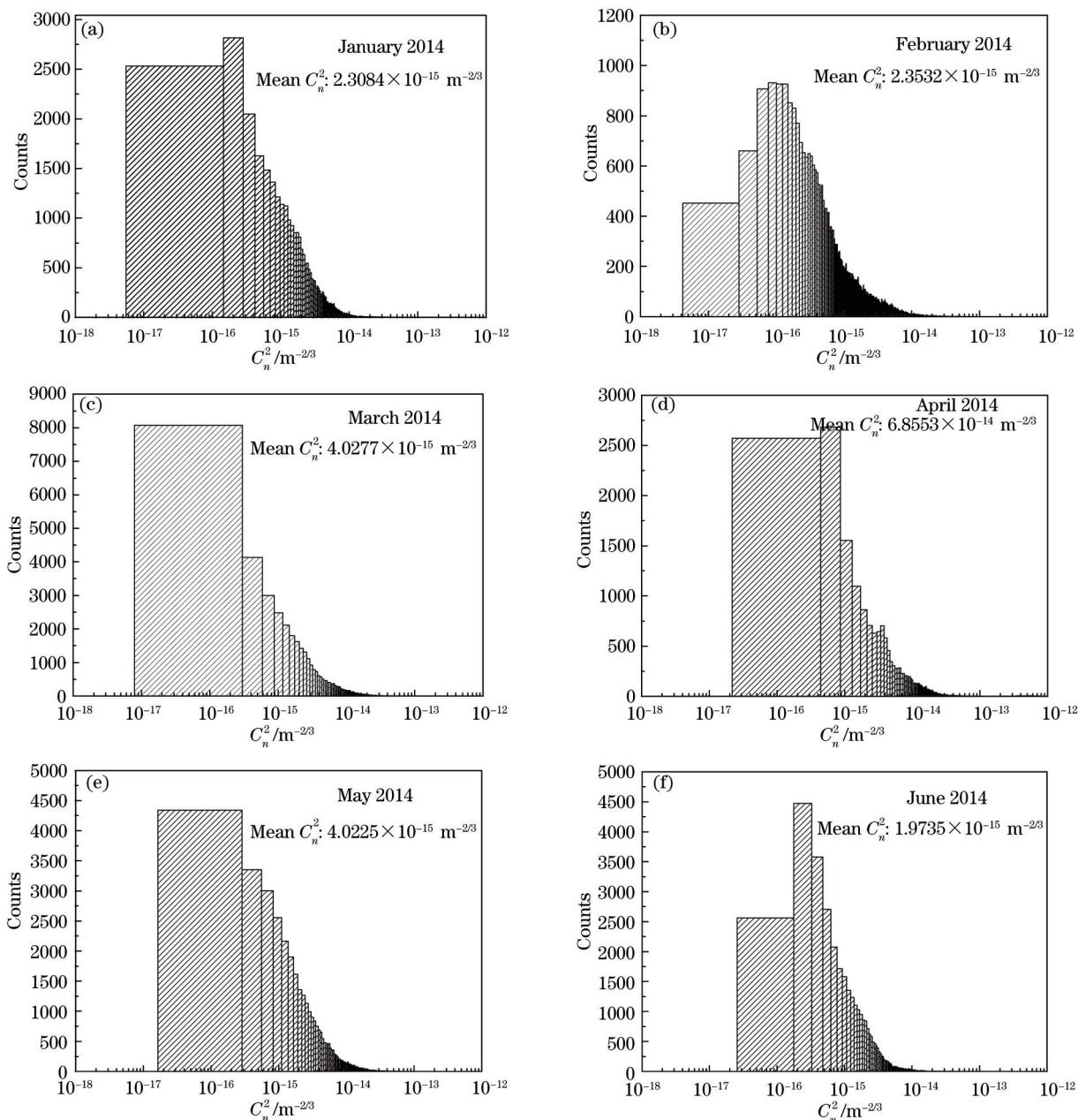


图3 1~6月大气折射率结构常数 C_n^2 频数统计直方图

Fig.3 Frequency distribution histogram of all values of C_n^2 from January to June

从图3中可以看出,在测试期间,不同月份近海面大气折射率结构常数 C_n^2 值分布区间范围有所差别,其中1月和3月 C_n^2 分布在 $10^{-18} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,2月 C_n^2 分布在 $10^{-18} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,4、5、6月 C_n^2 则分布在 $10^{-17} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,为了更加清楚地描述各个月不同数量级大气折射率结构常数的分布情况,表2中给出了相应 C_n^2 幂次出现频数以及所占各自月样本容量的百分比。从表中的统计结果可以很明显地看出,1~6月份约90%以上的大气折射率结构常数集中分布在 $10^{-17} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,这与其他特定环境下的 C_n^2 值相比存在一定的差异,例如文献[17]中所描述的城市环境下的 C_n^2 主要集中在 $10^{-16} \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,而文献[9]中戈壁滩地区的 C_n^2 主要集中在 $10^{-16} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,这说明近海面与其他环境相比, C_n^2 值整体偏小,整体低1~2个数量级。而根据 Davis 划分湍流强度的标准,城市环境和戈壁滩环境大气湍流属于强湍流和中等湍

流,近海面环境湍流属于中等偏弱强度湍流。

表2 1~6月 C_n^2 幂次分布情况

Table 2 Power distribution of C_n^2 from January to June

Month	$10^{-13} / \text{m}^{-2/3}$	$10^{-14} / \text{m}^{-2/3}$	$10^{-15} / \text{m}^{-2/3}$	$10^{-16} / \text{m}^{-2/3}$	$10^{-17} / \text{m}^{-2/3}$	$10^{-18} / \text{m}^{-2/3}$
January	6(0.02%)	838(2.76%)	16352(53.76%)	11823(38.87%)	1384(4.55%)	13(0.04%)
February	-	1575(4.1%)	16523(43.00%)	17397(45.28%)	2885(7.51%)	42(0.11%)
March	34(0.08%)	4123(10.11%)	20404(50.00%)	13214(32.38%)	3025(7.41%)	8(0.02%)
April	1854(8.76%)	3282(15.51%)	9719(45.92%)	6178(29.19%)	131(0.62%)	-
May	6(0.02%)	3735(10.02%)	21180(56.80%)	11252(30.18%)	1116(2.99%)	-
June	19(0.06%)	817(2.37%)	15947(46.18%)	17134(49.61%)	619(1.79%)	-

从图3中还可以看出,4月的月平均 C_n^2 值最大,为 $6.8553 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,3月和5月以及1月和2月的月平均 C_n^2 数值大小相当,6月的月平均 C_n^2 值最小,为 $1.9735 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。表3中还统计出了各个月份中的大气折射率结构常数的最小值、平均值以及最大值。从表中可以看出,1、2、3月 C_n^2 最小值都位于 $10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$ 数量级,4、5、6月 C_n^2 最小值处于 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 数量级,其中测试期间的最小值出现在2月,仅有 $4.1914 \times 10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$;除2月最大值为 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 数量级以外,其余月份的最大值都达到了 $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 数量级,其中测试期间的最大值出现在4月,为 $9.5684 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。

表3 1~6月 C_n^2 统计情况

Table 3 Statistics of C_n^2 from January to June

Month	Minimum / $\text{m}^{-2/3}$	Mean / $\text{m}^{-2/3}$	Maximum / $\text{m}^{-2/3}$
January	5.5245×10^{-18}	2.3084×10^{-15}	4.1863×10^{-13}
February	4.1914×10^{-18}	2.3532×10^{-15}	7.2320×10^{-14}
March	7.9002×10^{-18}	4.0277×10^{-15}	8.7284×10^{-13}
April	2.1802×10^{-17}	1.8553×10^{-14}	9.5684×10^{-13}
May	1.6423×10^{-17}	4.0225×10^{-15}	8.1269×10^{-13}
June	2.5637×10^{-17}	1.9735×10^{-15}	4.5281×10^{-13}

根据Davis不等式,对1~6月的大气折射率结构常数进行区间划分,可以统计出测试期间的近海面环境下大气湍流强度的分布情况,表4给出了各个月 C_n^2 值落在(1)式中每个不等式中的样本个数以及占各自样本容量的百分比。从表中可以看出,除2月份没有出现强湍流以外,在剩下每个月份中,强、中、弱湍流都有所涉及,但是不同强度湍流数据量所占各自样本容量的比重差别较为明显,其中所有月份中等强度湍流的 C_n^2 数据比例都高达95%以上,弱强度湍流的 C_n^2 数据比例约为1%左右,而强湍流 C_n^2 数据所占的比例非常小,基本可以忽略不计。从以上的分析中可以得出,在近海面环境大气中,主要以中等偏弱强度湍流为主,而在城市、戈壁滩等内陆其他环境下经常存在的强湍流情况几乎不会出现。

表4 1~6月大气湍流强度分布情况

Table 4 Turbulence distribution from January to June

Month	Weak	Moderate	Strong
January	729(2.39%)	29684(97.59%)	3(0.02%)
February	1522(3.96%)	36900(96.04%)	-
March	1974(4.84%)	38819(95.13%)	15(0.04%)
April	201(0.94%)	20929(98.88%)	34(0.16%)
May	488(1.31%)	36798(98.68%)	3(0.01%)
June	218(0.63%)	34316(99.36%)	2(0.01%)

3.2 大气折射率结构常数日变化特征

为了分析大气折射率结构常数的日变化特征,首先计算出测试期间每日 C_n^2 的小时平均值,然后对每个月相应时间段的小时平均值再进行平均,得出 1~6 月份近海面环境下 C_n^2 的日变化特征曲线,如图 4 所示。同时,为了衡量测试期间不同时间段大气折射率结构常数的起伏程度,图中还一并给出了对应时刻标准差的变化情况。

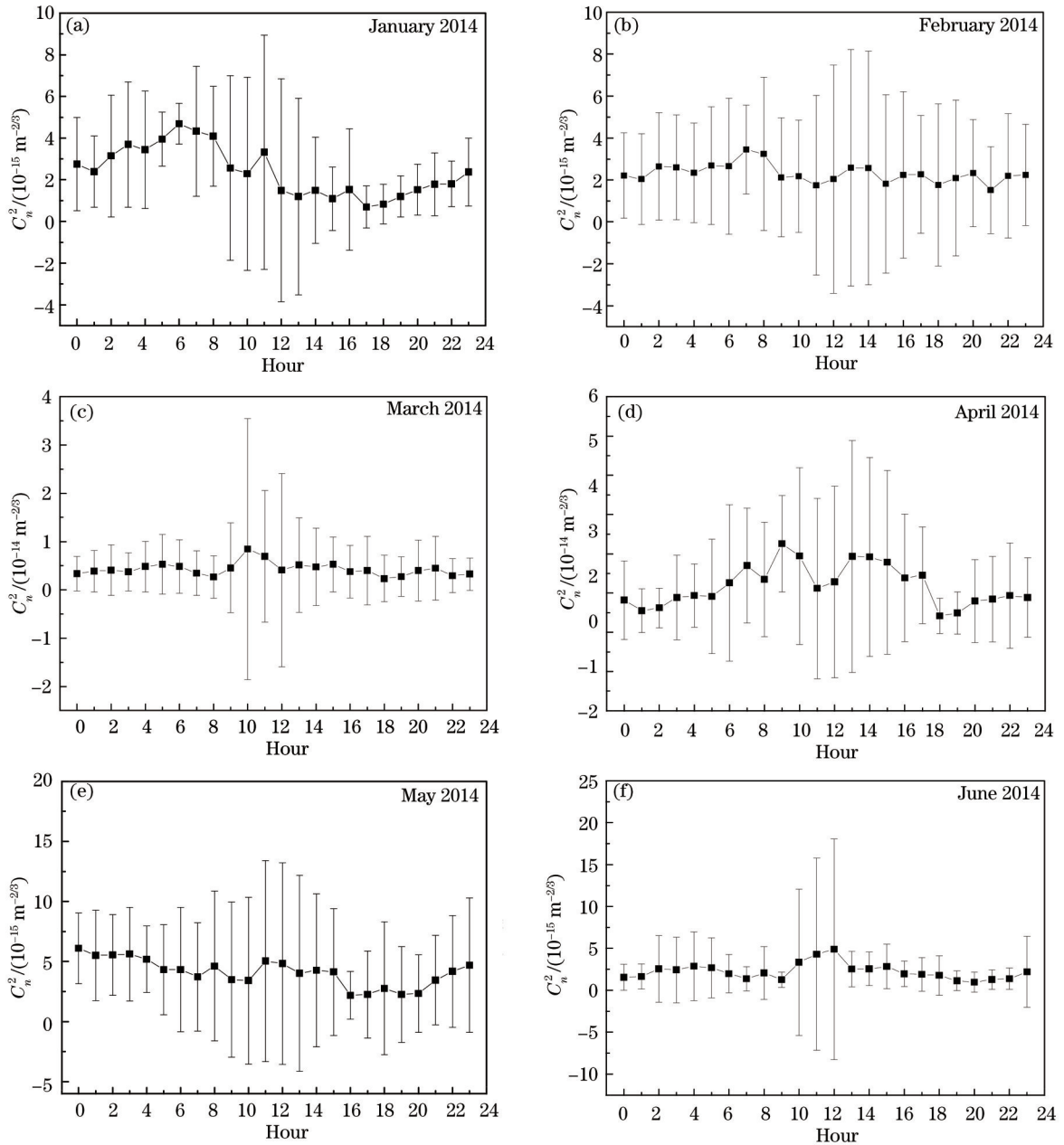


图 4 1~6 月 C_n^2 值日变化曲线图

Fig.4 Daily variation of C_n^2 from January to June

从图 4 中可以看出:

1) 在整个测试期间,不同时段 C_n^2 平均值变化较为平稳,没有出现非常明显的起伏特征,其中 1、2、3、5、6 月份 C_n^2 平均值的数量级主要集中在 $10^{-16} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,而 4 月份的数值稍有所升高,主要集中在 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,但是它们都属于典型的中等湍流强度范畴。这一统计特征明显不同于其他环境下 C_n^2 的变化特征,根据文献[9]和文献[17]中的描述,戈壁滩环境和城市环境下的 C_n^2 值在日出时段(08:00 左右)

和日落时段(19:00左右)出现一日当中的最小值,此时湍流强度最弱,文献中一般将这两个时段称之为“转换时刻”,此时刻的 C_n^2 值大小与白天中午时段最强湍流时刻的 C_n^2 最多可以相差 2~3 个数量级;文献[8]中测量的闽西山区环境中,在早晨 07:00 左右同样存在一个 C_n^2 值最小的“转换时刻”。但是,在测量的近海面大气环境中,24 h 之内的 C_n^2 值没有出现文献中所述的“转换时刻”的变化特征。此外,在已有文献所描述的环境中,夜间的 C_n^2 值低于白天的 C_n^2 值,这一点在文献[8]描述的山区环境中表现的尤为明显,但是从图 4 中可以发现,在近海面环境下,大气折射率结构常数在夜间和白天没有发现明显的差别。

2) 在计算 1~6 月份 C_n^2 小时均值的同时,也得到了反映相应时段数据离散程度的标准差值。尽管一天不同时间段的 C_n^2 均值没有出现较为明显的起伏,但是从图 4 中不难看出,在中午 11:00~14:00 时段 C_n^2 的标准差普遍大于其他时段的标准差,这说明该时段的 C_n^2 值分布较为离散,大气湍流活动相对较为剧烈,这一特征在 2、4、6 月份表现得尤为明显,但是与其他内陆环境相比,近海面环境下中午时段 C_n^2 数据的起伏程度仍然较弱。

从以上的分析中可以看出,近海面环境与其他内陆环境相比,大气折射率结构常数的日变化曲线表现

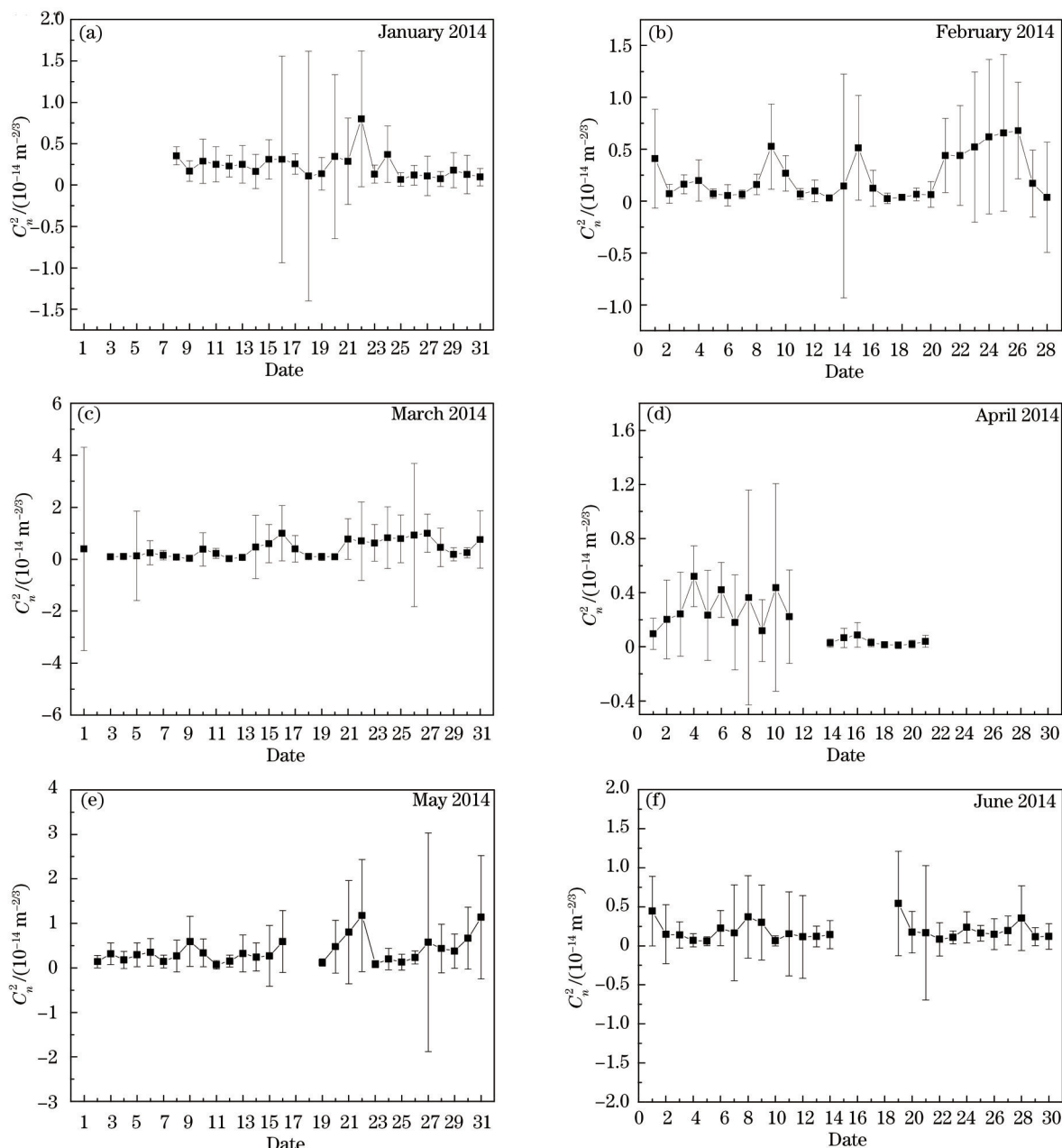


图 5 1~6 月 C_n^2 值月变化曲线图
Fig.5 Monthly variation of C_n^2 from January to June

出不一样的特征,这一研究成果可以为光电系统选择合适的工作时段提供比较有价值的参考。

3.3 大气折射率结构常数月变化特征

对测试期间的每天大气折射率结构常数求日平均,得到了 C_n^2 值的月变化曲线图,统计结果如图 5 所示。并且为了反映每个月当中大气折射率结构常数的起伏情况,图 5 中同样标记出了对应日期数据样本的标准差。

从图 5 中可以看出,测试期间不同月份大气折射率结构常数的日均值出现了一定程度的起伏,具体表现为:1 月份和 2 月份的日均值在 $10^{-16} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内变化,3、5、6 月份的日均值在 $10^{-16} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内变化,而 4 月份的日均值相对较高,主要分布在 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,但是按照 Davis 划分,所有月份的日均值全部属于中等偏弱强度湍流范围。表 5 中统计出了 1~6 月份每月日均 C_n^2 的最值分布情况,并且在每个数值后面的括号中注明了该数据出现的日期,从表中可以看出,测试期间日均 C_n^2 最大值出现在 4 月 4 日,为 $5.21 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,而最小值出现在 3 月 12 日,为 $2.25 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 。

表 5 1~6 月日平均值统计情况

Table 5 Statistics of the daily mean value from January to June

Month	Minimum / $\text{m}^{-2/3}$	Maximum / $\text{m}^{-2/3}$
January	6.67×10^{-16} (25)	8.00×10^{-15} (22)
February	2.45×10^{-16} (17)	6.79×10^{-15} (26)
March	2.25×10^{-16} (12)	1.00×10^{-14} (16)
April	1.21×10^{-15} (19)	5.21×10^{-14} (4)
May	7.03×10^{-16} (11)	1.18×10^{-14} (22)
June	5.97×10^{-16} (5)	5.95×10^{-14} (19)

在图 5 中,每个日均值上所标注的标准差表示单日大气折射率结构常数分布的离散程度。从图中可以看出,1~6 月份每天 C_n^2 数据的分布表现出不一样的特点,例如在 1 月份的上旬和下旬,标准差值较小,而在该月的中旬,标准差值较大,说明该时间段内 C_n^2 分布较为离散;在 2 月份,14 日和中下旬的标准差较大, C_n^2 值分布较为离散;在 3 月份,除了 1 日和 27 日之外,其他日期的标准差都较小,说明 C_n^2 数据分布比较集中;4 月份 C_n^2 数据的分布特征较为明显,前半月的标准差整体比后半月的标准差大,也就是说前半月每天的 C_n^2 数据分布比较离散,而后半月的数据分布非常集中;在 5 月份,除了 27 日的标准差较大, C_n^2 数据分布相对较为离散之外,其余日期的数据没有出现较大的起伏;与其他月份相比,6 月份每天的标准差都相对较小,说明 C_n^2 数据整体分布比较集中。

通过以上的数据分析,对烟台地区 1~6 月份近海面大气折射率结构常数的日均值变化以及每日的数据分布的离散程度有了准确的认识,这将为分析激光应用系统在该地区每天的工作情况提供一定的数据支撑。

4 结 论

利用 BLS 闪烁仪对烟台地区一条距离为 2.56 km 的近海面链路进行了为期 6 个月的大气湍流效应测量,通过从大气折射率结构常数频数统计、日变化和标准差分析以及月变化和标准差分析角度,对所采集到的样本数据进行了统计特性研究,分别得到了以下结论:

1) 从测试期间 C_n^2 值频数统计特性中可以看出,虽然不同月份的近海面大气折射率结构常数的变化范围有所差异,但是 90% 以上的 C_n^2 数据集中在 $10^{-17} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,因此,按照 Davis 不等式划分,近海面大气湍流属于典型的中等强度湍流和弱强度湍流,这一结论在研究大气湍流对激光工程影响时非常关键,因为它涉及到选择何种激光传输理论模型更为合适的问题;同时还对每个月大气折射率结构常数的最值和均值进行计算,结果发现测试期间 4 月份的月平均值最大,而 1 月和 2 月以及 3 月和 5 月的月平均值近似相等,6 月份的月平均值最小。

2) 从测试期间的 C_n^2 值日变化曲线中可以看出,不同时段近海面大气折射率结构常数小时均值主要分布在在 $10^{-16} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,属于中等强度湍流,没有表现出其他环境较为常见的“转换时刻”变化特

征,并且该环境下的大气折射率结构常数在夜间与白天没有出现明显的差异,这将会对大气激光应用系统选择合适的工作时段提供非常有价值的参考依据;同时,从不同时段 C_n^2 数据的标准差变化特征中可以看出,该环境下中午时段的 C_n^2 值分布与其他时段相比较为离散,但是相对于其他环境而言,起伏程度仍然较小。

3)从测试期间的 C_n^2 值月变化统计特性中可以看出,近海面环境下不同月份 C_n^2 的日均值变化范围同样集中在 $10^{-16} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。同时,还对测试期间每个月的日均 C_n^2 最值情况进行统计,其中最大值出现在4月4日,最小值出现在3月12日;从不同月份大气折射率结构常数标准差的变化中还可以看出,每个月的不同时间段的 C_n^2 数据的离散程度也各不相同。

近海面大气折射率结构常数所表现出的统计特性说明不同地理环境下大气湍流变化的复杂性,由此会对大气激光工程可行性分析、光学系统设计以及激光工程使用效能的评估带来影响。因此,通过开展近海面环境下大气折射率结构常数的实际测量工作,不仅可以在原有测试的基础上进一步丰富我国不同地理环境下 C_n^2 数据库,更为关键的是为近海面环境激光传播特性的研究和光电系统的实际应用提供了非常重要的参考依据。同时,随着测试数据的不断积累,下一步将继续对不同季节以及不同天气条件下近海面大气折射率结构常数的变化特征进行分析。

参 考 文 献

- 1 L C Andrews, R L Phillips. Laser Beam Scintillation with Applications [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001: 201-240.
- 2 Wu Xiaoqing, Ma Chengsheng, Wang Yingjian. Long-term measurements and statistics study on refractive index structure parameter of surface layer [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(4): 551-556.
吴晓庆, 马成胜, 王英俭. 近地面折射率结构常数的长期测量和统计分析[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(4): 551-556.
- 3 Chen Chunyi, Yang Huamin, Tong Shoufeng. Measurement experiment and analysis of laser atmospheric structure constant of refractive index [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s1): 422-426.
陈纯毅, 杨华民, 佟首峰. 激光大气折射率结构常数测量实验与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(s1): 422-426.
- 4 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Liu Min. Affect analysis of receiving aperture on bit-error rate performance in free space optical communication systems under different visibilities [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006003.
吴晓军, 王红星, 刘敏. 不同能见度条件下接收孔径对无线光通信误码率性能影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006003.
- 5 Hu Qingsong, Huang Yuhua, Wang Junbo, et al.. Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906004.
胡庆松, 黄玉划, 王俊波, 等. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906004.
- 6 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al.. Profile and character of atmospheric temperature [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 592-596.
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.
- 7 Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Profile and character of atmospheric structure constants of refractive index [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 485-490.
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. 不同地区大气折射率结构常数分布特性及分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 485-490.
- 8 Lü Weiyu, Yuan Ke'e, Tan Bin. Analysis of near-surface characteristics of refractive index structure parameter in autumn and winter of western Fujian areas [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2013, 4(8): 18-25.
吕炜煜, 苑克娥, 谈斌. 闽西地区秋冬季近地面大气折射率结构常数特性分析[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 4(8): 18-25.
- 9 Feng Shuanglian, Zhang Zhigang, Qiang Xiwen. Statistical analysis of atmospheric refractive index structure constant near ground in Gobi region [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 39-42.
封双连, 张志刚, 强希文. 戈壁地区近地面大气折射率结构常数的统计分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 39-42.
- 10 Andreas E L. Estimating C_n^2 over snow and sea ice from meteorological data [J]. J Opt Soc Am, 1988, 5(4): 481-495.
- 11 Walters D L. Diurnal and seasonal variations in the atmospheric structure parameter C_n^2 that affect the atmospheric modulation transfer function(MTF) [C]. SPIE, 1981, 277: 6-9.
- 12 Andreas E L. The refractive index structure parameter, C_n^2 , for a year over the frozen Beaufort sea[J]. Radio Science, 1989, 24(5): 667-679.

- 13 Clifford S F , Ochs G R. Saturation of optical scintillation by strong turbulence [J]. J Opt Soc Am, 1974, 64(2): 148-154.
- 14 Wang Tingyi, Ochs G R, Clifford S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 [J]. J Opt Soc Am, 1978, 68(3): 334-338.
- 15 Robert S Lawrence, John W Strohbehn. A survey of clear-air propagation effects relevant to optical communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10): 1523-1545.
- 16 Wu Jian, Le Shixiao. The Light Propagation Theory in Random Medium[M]. Chengdu: Institute of Radio Engineering Press, 1988: 142-144.
吴 健, 乐时晓. 随机介质中的光传播理论[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988: 142-144.
- 17 Zhipeng Ren, Guangcai Cui, Chunyi Chen. The experiment of a system for measurements of the refractive index structure constant along a 1 km free-space laser propagation path [C]. 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, 2012: 314-318.

栏目编辑: 史 敏