

双波段近海激光通信大气参数测量与估算模型修正

高世杰^{1,2} 盛磊¹ 李一芒¹ 吴志勇¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对定量评估大气湍流对近海激光通信影响的问题,提出了基于对850 nm和1550 nm波段激光光斑同步采集的大气折射率结构常数测量方案。采用现场可编程门阵列(FPGA)+多核数字信号处理器(DSP)架构的实时图像处理系统实现目标中心位置的提取与目标灰度和的统计,进而得到激光自发发射端至接收端的到达角起伏方差和闪烁指数。将两个不同波段的同步采集结果分别代入已有的大气折射率结构常数计算模型中,比较同一模型不同波段所得结果的相似性,并对相应模型中的参数进行修正,使同一时刻及环境的两种波段条件下,经修正模型计算得到的大气折射率结构常数相对稳定可靠。实验结果表明,采用改进模型对大气折射率结构常数进行计算,所得结果相似度不低于80%,可作为定量评估大气湍流对近海激光通信影响的重要参数。

关键词 大气光学; 大气湍流; 激光通信; 折射率结构常数; 到达角起伏方差; 闪烁指数

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0613001

Measurement and Estimation Model Correction of Atmosphere Parameter for Offshore Laser Communication by Dual-Bands

Gao Shijie^{1,2} Sheng Lei¹ Li Yimang¹ Wu Zhiyong¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For quantitative evaluation problems of the influence of the atmospheric turbulence on offshore laser communication, an approach of measurement of the atmospheric refraction structure constant is proposed based on acquisition and synchronization of 850 nm and 1550 nm band of the laser. Using real-time image processing system field programmable gate array (FPGA) and multi-core digital signal processor (DSP) architecture to realize extraction of target center position and statistics of target gray, the angle of arrival fluctuation variance and the scintillation index are obtained. The dual-band results are calculated by the classic model to obtain the atmospheric structure constant of refractive index and then the obtained results of dual-band under the same condition are compared, and the parameters of the corresponding model are revised, so that the atmospheric refractive index structure constant is calculated to be relatively stable and reliable. Experimental results show that using the improved model to calculate the atmospheric refractive index structure constant, the similarity of results is not less than 80%, and the important parameters can be used as a quantitative assessment of the influence of the atmospheric turbulence on offshore laser communication.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; laser communication; refractive index structure constant; angle of arrival fluctuation variance; scintillation index

OCIS codes 010.1330; 010.3310; 290.5930

收稿日期: 2015-01-06; 收到修改稿日期: 2015-01-29

基金项目: 国家863计划(2014AA7031010B)

作者简介: 高世杰(1979—),男,博士研究生,副研究员,主要从事光通信技术与光电测控总体技术等方面的研究。

E-mail: yoursjohn@163.com

导师简介: 吴志勇(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测控设备总体技术和光通信技术等方面的研究。

E-mail: wuzy@ciomp.ac.cn

1 引 言

由于激光通信系统具有带宽、高速、抗截获能力强、抗干扰能力强和轻小型等突出优点,使其非常适合深空、星际、星地、空空、空地等链路通信,在近年来备受关注^[1-4]。随着我国海洋军力不断发展,激光通信系统在船与船、船与岸间的应用前景日趋广阔^[5]。同深空、星际、空空等应用环境不同,船用激光通信系统的信号传输媒介是位于海面上方十几米至几十米的大气,在这一区域大气湍流对通信链路保持和通信质量有着严重的干扰,因此对上述影响进行定量评估有着重要的意义。

为解决对大气湍流变化这一非平稳过程的描述问题,Kolmogorov提出引入过程参数之差的统计描述法,Fried发展了上述思想,引入了可描述多变量过程的超结构函数,其中大气折射率结构常数 C_n^2 是表征大气湍流强弱的重要物理量^[6]。国内外诸多研究机构提出了大气折射率结构常数的测量方法,并进行了相关实验:美国海军实验室(NRL)公布了其在切萨皮克湾,海拔高度 5~30 m,跨海距离 16 km 的两地进行的一系列实验结果,其中包括采用到达角(AOA)起伏方差法对 C_n^2 进行测量^[7];哈尔滨工业大学高宠等^[8]在相距 3.2 km 的两地进行到达角起伏方差测量实验;长春理工大学陈纯毅等^[6]在园区内相距 600 m 两地分别采用闪烁指数测量法和到达角起伏方差法测量了 C_n^2 ;中国科学院安徽光学精密机械研究所不但在海拔 5 m,相距 1 km 的两地采用上述两种方法对 C_n^2 进行了测量,同时提出了基于热感探空仪的测量方法^[9-10];中国科学院光电技术研究所则通过波前传感器测量大气湍流参数并进行了 1 km 激光水平大气传输实验^[11]。综上所述,与美国海军实验室相比,目前国内已公开的实验均未完全满足船用激光通信系统的应用环境要求,即海拔高度 10~30 m,距离不少于 10 km。

本文介绍了在海拔 15~20 m,跨海距离 16.45 km 的两地进行的大气折射率结构常数测量实验与分析结果。与已有实验不同,本实验提出了对远距离传输的两种波段激光进行同步采集,由于 C_n^2 是与波长无关的大气结构常数,因此可用两种波段的采集与计算结果进行对比,证明结果的相对正确性。实验过程为:采用改进的图像复原和图像检测算法对激光光斑图像进行处理,提取图像信息中所包含的到达角起伏方差和闪烁指数等信息;通过实测数据对现有估算模型进行修正,采用多项式拟合方法,将经典估算模型中的固定参数替换为关于时间的函数,函数中各项系数经最小二乘法确定,以一段时间内不同波段的计算结果之差最小为约束条件。估算模型应用于翌日相同环境及时段条件时,经修正模型计算得到的 C_n^2 相对稳定,说明该模型能够较准确地反应不同时段相关海域的大气湍流强弱。

2 大气折射率结构常数测量基本理论

2.1 到达角起伏方差测量法

根据 Andrews 等^[12]给出的 Kolmogorov 谱条件,到达角起伏方差与大气折射率结构常数间的关系为

$$\langle \beta^2 \rangle = \begin{cases} 1.64C_n^2 L l_0^{-1/3} [1 - 0.72(\kappa_0 l_0)^{1/3}], & 2W_c \ll l_0 \\ 2.91C_n^2 L (2W_c)^{-1/3} [1 - 0.81(2\kappa_0 W_c)^{1/3}], & 2W_c \gg l_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\langle \beta^2 \rangle$ 为到达角起伏方差, C_n^2 为大气折射率结构常数, L 为传输距离, l_0 为内尺度, $\kappa_0 = 2\pi/l_0$, L_0 为外尺度, W_c 为接收半径。

NRL 在其实验中将(1)式进行了简化,在对内外尺度进行了估计后得到大气折射率结构常数计算模型为

$$C_n^2 = \frac{\sigma_\beta^2 D^{1/3}}{1.093L}, \quad (2)$$

式中 σ_β^2 为到达角起伏方差, D 为接受口径的直径。若完全忽略内外尺度的影响,则当接收口径远大于内尺度时,(1)可简化为^[9]

$$C_n^2 = \frac{\sigma_\beta^2 D^{1/3}}{2.91L}. \quad (3)$$

Churnside 等提出的估算模型为^[9]

$$C_n^2 = \frac{\sigma_\beta^2 D^{1/3}}{1.92L}, \quad (4)$$

已被中国科学院安徽光学精密机械研究所应用于具体实验中。

对比以上 C_n^2 计算模型可知, (2)、(3)、(4) 式均可视作(1)式在接收口径远大于湍流内尺度时, 对 $1 - 0.81(2\kappa_0 W_c)^{1/3}$ 项进行了不同的简化或估算而得到的。然而大气湍流及其内外尺度影响是在不断变化的, 仅用固定的估计值或简化模型的等效值表示 $1 - 0.81(2\kappa_0 W_c)^{1/3}$ 会对计算结果产生较大影响。本文提出 C_n^2 的计算表达式改进为

$$C_n^2 = \frac{\sigma_\beta^2 D^{1/3}}{f(t)L}, \quad (5)$$

式中关于时间 t 的函数 $f(t)$ 是由一定时段内双波段同步测量数据拟合得到, 算法描述: 设 1550 nm 波段实测数据按(5)式计算得到的结果为 $C_{n,1550}^2$, 850 nm 波段的计算结果为 $C_{n,850}^2$, 则拟合所得 $f(t)$ 需要满足 $0 < f(t) \leq 2.91$, 并使 $|C_{n,1550}^2 - C_{n,850}^2|$ 最小。当采用 6 次多项式和 5 次多项式分别对 $f(t)$ 进行拟合时两个 $\min\left(\frac{2 \times |C_{n,1550}^2 - C_{n,850}^2|}{C_{n,1550}^2 + C_{n,850}^2}\right)$ 之差小于 0.01, 即采用 6 次多项式进行拟合相比 5 次多项式对结果影响小于 1%, 因此设 $f(t)$ 表达式为 5 次多项式, 即

$$f(t) = a_0 t^5 + a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t + a_5. \quad (6)$$

2.2 闪烁指数测量方法

光强起伏(闪烁)是大气湍流引起的最明显最常见的光传输效应之一。光波在大气湍流中传输时光强随时间变化而产生随机起伏的现象称谓闪烁, 其原因是大气折射率起伏在导致传输激光相位变化的同时, 也导致传输激光的振幅起伏, 进而产生散射强度起伏的现象。Tartaskii 运用 Rytov 近似对激光通过大气后的接收光强起伏, 即光强闪烁给出了理论模型, 在弱起伏条件下, 根据此模型得出水平传输时平面波的对数强度方差为

$$\sigma_{\ln I}^2 = a C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (7)$$

式中当光波取球面波时, $a = 0.496$, 取平面波时, $a = 1.23$, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。

当仅考虑外尺度影响, 而将内尺度忽略为 0 时的改进闪烁指数表达式为

$$\sigma_{I_0}^2 = \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1, \quad (8)$$

式中 σ_R^2 为 Rytov 方差, 一般地, $\sigma_R^2 = \sigma_{\ln I}^2$ 。同时考虑内外尺度的改进的闪烁指数表达式为

$$\sigma_{I_0, I_0}^2 = \exp\left[\sigma_{I_0}^2 - \sigma_{I_0}^2 + \frac{0.51\sigma_{PL}^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1, \quad (9)$$

式中 $\sigma_{I_0}^2$, $\sigma_{I_0}^2$ 分别为内外尺度下的闪烁方差, σ_{PL}^2 是考虑内尺度因素的 Rytov 方差。采用(8)、(9)式计算 C_n^2 , 式中的大气湍流内外尺度无法确定, 因此本文提出与 2.1 节中相似的拟合方法按下式进行计算:

$$C_n^2 = \frac{\sigma_{\ln I}^2}{g(t)k^{7/6} L^{11/6}}, \quad (10)$$

式中 $g(t)$ 的统计方法与 $f(t)$ 的统计方法相同, 由于 4 次对比 3 次多项式表示 $g(t)$ 所得结果误差小于 1%, 因此 $g(t)$ 由 3 次多项式表示为

$$g(t) = b_0 t^3 + b_1 t^2 + b_2 t + b_3. \quad (11)$$

3 目标提取方法

到达角起伏方差测量方法和闪烁指数测量方法都需要获得接收端的激光光斑信息, 本文采用基于光斑图像提取的方法^[13], 其工作过程为: 相机采集激光光斑图像, 实时处理系统检测图像中的目标, 并根据检测结果计算目标的质心位置与目标灰度和, 在连续采集与处理后, 通过质心位置的变化可以计算出到达角起伏方差, 通过目标灰度和及相机的量子转换效率能够计算出闪烁指数。上述过程中, 对目标的检测是关键技术, 在图像处理领域中, 对目标进行检测的一般流程是先进行滤波等预处理运算, 然后对图像进行分割。本文提出基于方位滤波器的目标检测算法, 首先对图像进行中值滤波, 去除孤立的噪声点, 然后采用方位滤波提高图像的信

噪比,并通过阈值分割方法分离目标与背景,最后根据提取的目标信息代入原图计算目标质心位置并统计目标灰度和。采集结果中会出现目标灰度饱和与目标丢失情况,对于单帧采集结果来说,当目标灰度值饱和时,计算的质心位置与目标灰度和均不再准确;而当目标丢失时,则根本无法计算质心位置与目标灰度和。实际计算中所求为一段时间内位置变化与灰度变化的方差,实测数据表明上述饱和或丢失现象每 50000 帧出现 1 帧,因此当出现该情况时,采用其前后 2 帧的平均作为替代,对最终结果所产生的影响可以忽略。

当激光通信链路经过大气时,由于受湍流的影响,系统所获得的激光光斑图像是退化后的图像,会导致对质心位置提取精度下降。工程中常用的形态学算子会使目标中心位置发生改变,影响光斑中心检测精度^[14]。国内外学者针对大气湍流导致图像退化提出的解决方法可归纳为 3 类:多帧重构法^[15],自适应光学法^[16]和盲复原方法^[17]。多帧重构法属于事后处理方法,其原理与实时性相矛盾;自适应光学实现方式复杂;盲复原方法若不进行迭代则复原效果不佳,若迭代次数过多则难以满足实时性要求。实验中采用改进的激光光斑退化图像的快速盲复原方法,在对光斑图像进行快速复原的基础上,对光斑目标与进行分割,并通过连通域计算实时提取复原后的光斑中心位置信息。

为保证系统的实时性,在对复原后的图像进行预处理时设计采用空域滤波,与频域滤波相比,FPGA 的并行处理机制更适合实现空域滤波算法。本文提出采用一维拉普拉斯高斯(LOG)算子对图像进行滤波,表达式为

$$L(x) = \frac{d^2}{dx^2} g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^3} \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (12)$$

根据一维 LOG 算子函数定义多方位滤波算子为

$$L_{\text{multi-local}}(i) = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^4 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_l^3} \left(1 - \frac{i^2}{\sigma_l^2}\right) \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma_l^2}\right) \begin{cases} l=1, i=x, x=-M_2, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_1 \\ l=2, i=y, y=-M_4, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_3 \\ l=3, i^2=x^2+y^2, x=y=-M_6, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_5 \\ l=4, i^2=x^2+y^2, x=-y=-M_8, \dots, -1, 0, 1, \dots, M_7 \end{cases}, \quad (13)$$

将原始图像同多方位滤波算子进行卷积运算得到滤波后图像 $I(x,y)$ 为

$$I(x,y) = f(x,y) \otimes L_{\text{multi-local}}(i). \quad (14)$$

滤波效果与高斯分布标准差 σ_l 和序列长度 $M_j(j=1,2,\dots,8)$ 有关。 σ_l 越大,对噪声的滤波效果越好,但会丢失越多的边缘信息; σ_l 越小,对目标的检测效果越好,但对噪声的平滑能力就越弱。由于方向滤波算子是关于变量平方的 e 负指数函数,当变量的绝对值很大时,算子函数值接近于 0,因此序列长度过长没有意义;序列长度过短则起不到平滑噪声的作用。由于实际工程中,光斑所成形状不是严格的圆形,因此通过设置不同的 σ_l 值能够适合对相应形状光斑的处理。

4 实验与分析

4.1 实验平台搭建

实验在位于大连相隔 16.45 km 的两地进行,距离及海拔高度由差分式 GPS 获得,具体实验位置与实验场景如图 1 所示,实验在初冬晴朗天气,西北风 3 级的条件下展开,发射端功率根据接收情况进行调节,保证尽可能少地出现目标饱和与丢失情况。



图 1 实验地点与场景图

Fig.1 Place and scene of the experiment

实验平台如图 2 所示,主要由发射系统,接收平台和机柜组成,具体工作过程为:发射端由两台激光器,经 80 mm 口径通信镜头向对岸发射 850 nm 和 1550 nm 波段的激光,接收端在平台上放置两个 150 mm 口径,

1500 mm 焦距的卡式结构光学天线, 分别对两个波段的光束进行接收, 其中相机 1 选用可见光相机, 其在 850 nm 波段的量子相应效率为 12%, 在 1550 nm 波段的量子相应效率可视作 0, 相机 2 选用短波红外相机, 在 1550 nm 波段的量子相应效率约为 40%, 在 850 nm 波段量子相应效率极低, 两款相机在时统终端的触发下, 以 500 Hz 的频率进行光斑图像同步采集, 经 Camera Link 数据线分别传输至安装了实时图像处理系统的计算机中, 实时图像处理系统对目标进行处理, 并经 PCI-e 协议将原始数据和目标信息发送至计算机中, 计算机可向实时图像处理系统发送控制命令, 同时能够进行图像显示, 目标信息显示以及图像存储等操作。

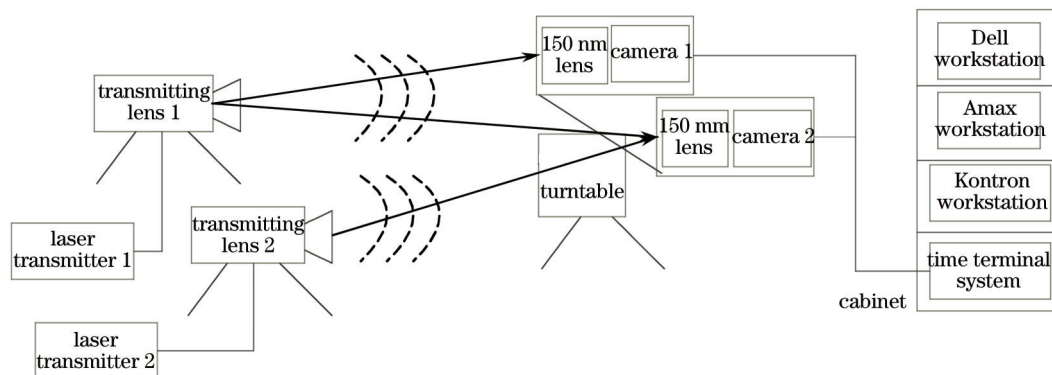
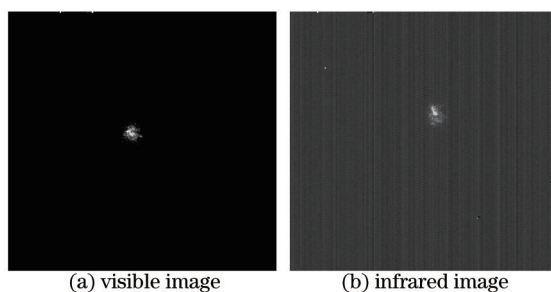


图 2 实验平台框图

Fig.2 Block diagram of the platform

同步图像采集结果如图 3 所示, 其中图 3(a)为可见光相机采集图像, 图 3(b)为红外相机采集图像, 时间信息叠加在图像的第一行上(图像第一行未实时处理)。



(a) visible image (b) infrared image

图 3 同步采集图像

Fig.3 Synchronization images

4.2 计算结果与分析

NRL 通过频域分析确定了其实验环境下的到达角起伏频率在 0.2 Hz 以上, 本文采用离散傅里叶变换 (DFT) 对采集的目标位置信息进行分析, 得到结果如图 4 所示, M_t 为测量得到的偏移幅值, I_N 为离散傅里叶变换幅值。

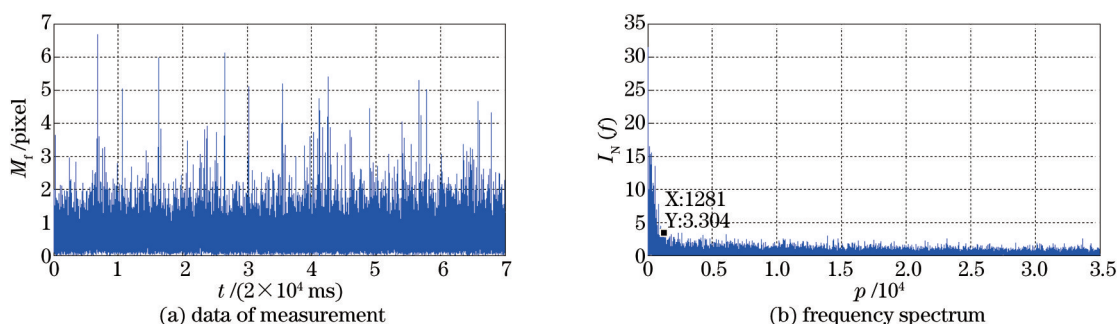


图 4 离散傅里叶变换幅值

Fig.4 Amplitude of DFT

$$F_{\text{freq}} = \frac{p \times S}{N}, \quad (15)$$

式中 F_{freq} 为频率, p 为离散化频率, S 为每秒采样点数, N 为总采样点数。结合图 4 结果分析到达角起伏率在 10 Hz 以上, 因此在进行起伏方差计算时, 采样频率应不低于 10 Hz。

按(2)式的到达角起伏方差测量法和(6)式的闪烁指数测量法, 分别对短波红外相机和可见光相机采集的数据进行处理, 经计算到达角起伏和闪烁指数得到 C_n^2 如图 5 所示。

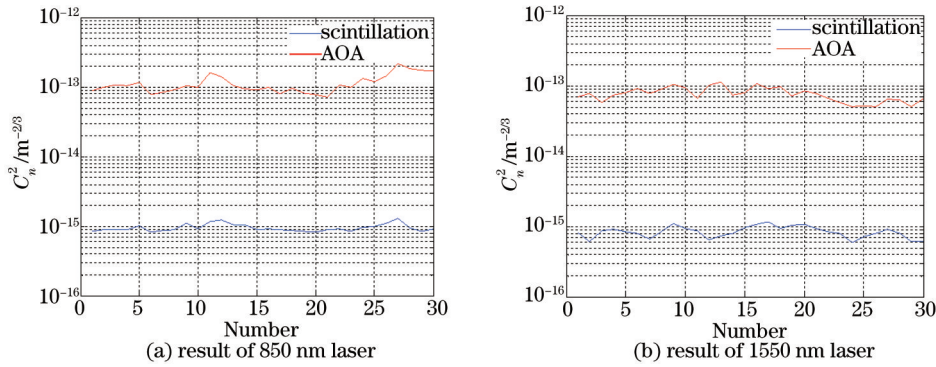


图 5 经典公式计算结果

Fig.5 Results calculated by classic formula

图中, 红色线条表示采用到达角起伏方差测量的 C_n^2 值, 蓝色线条表示采用闪烁指数方法得到的 C_n^2 值, 两种方法相差两个数量级, 原因为湍流谱包含的高波数湍涡少, 对闪烁效应起主要贡献的湍涡数少, 闪烁效应弱, 低波数湍涡在湍流谱中的比重多, 漂移效应强^[9]。

在船用激光通信系统应用过程中评价大气湍流强弱时, 最重要的并非折射率结构常数 C_n^2 的绝对值, 而是其在不同大气湍流强度下的相对值, 因此重点需要比较的是双波段测量结果的一致性。本文采用起伏方差和闪烁方差的均值之比(采用小值比大值, 取百分制)作为对双波段计算结果的一致性的量化判据, 定义为所得统计数据的相似度。图 5 所示双波段计算结果中, 起伏方差相似度为 43.01%, 闪烁方差相似度为 60.23%。为了能够按(5)式的到达角起伏方差测量法和(10)式的闪烁指数测量, 于第一实验日对 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的拟合, 结果如表 1 所示, 其中按子夜, 凌晨, 早晨, 中午, 下午和晚上共 6 个时段进行数据采集, 在时统终端的控制下, 每个时段采集 30 min 数据。

表 1 系数拟合结果

Table 1 Result of the fitted ratio

Time	t/s	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_6	b_0	b_1	b_2	b_3
00:00:53~	53~	6.34×	-2.78×	4.08×	-2.07×	2.77×	2.26×	-4.03×	-1.04×	2.77×	1.13×
00:30:52	1852	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁰	10 ⁻¹³	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵	10 ⁰
04:00:29~	14429~	2.19×	-1.75×	5.57×	-8.87×	7.04×	-2.23×	-2.90×	1.32×	-2.02×	1.04×
04:30:28	16228	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹²	10 ⁻⁸	10 ⁻⁴	10 ⁰	10 ⁻⁴	10 ⁻¹³	10 ⁻⁸	10 ⁻⁴	10 ⁰
08:01:02~	28862~	1.82×	-2.67×	1.57×	-4.60×	6.74×	-3.95×	-2.50×	-1.83×	-4.21×	3.84×
08:31:01	30661	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹²	10 ⁻⁷	10 ⁻³	10 ¹	10 ⁻⁵	10 ⁻¹³	10 ⁻⁸	10 ⁻⁴	10 ⁰
12:00:15~	43215~	1.56×	-3.43×	3.02×	-1.33×	2.92×	-2.58×	-3.77×	-4.80×	2.03×	-2.85×
12:30:14	45014	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁷	10 ⁻¹²	10 ⁻⁷	10 ⁻²	10 ²
16:00:47~	57647~	-6.25×	-1.82×	-2.13×	1.25×	-3.64×	4.26×	-1.69×	2.97×	-1.74×	3.41×
16:30:46	59446	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁴	10 ⁻⁶	10 ¹	10 ³	10 ⁷	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁶	10 ⁻¹	10 ³
20:00:32~	72032~	3.96×	-1.45×	2.12×	-1.53×	5.68×	-8.32×	-2.13×	4.58×	-3.28×	7.82×
20:30:31	73831	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁶	10 ⁻¹	10 ³	10 ⁷	10 ⁻¹²	10 ⁻⁷	10 ⁻²	10 ²

在第二实验日按改进方法对数据进行了处理, 其中 00:04:46~00:34:45 时段所得结果如图 6 所示。

起伏方差相似度为 80.47%, 闪烁方差相似度为 87.54%。全天对比结果如表 2 所示, 其中序号依次表示表 1 中的各时段。

从表 2 可以看出, 本文所提方法能够对上述时段实验所在区域环境下的大气湍流强弱进行量化评估。根据第二日数据对 $f(t)$ 和 $g(t)$ 进行拟合, 所得均值与第一日拟合所得均值比较结果如图 7 所示, 图 7(a) 为对

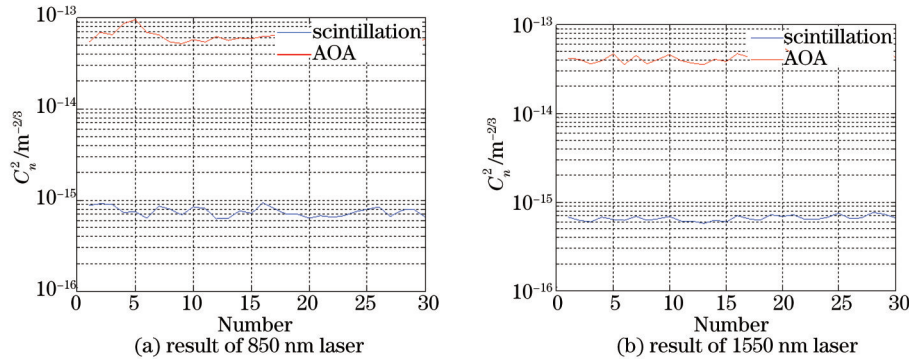


图6 改进方法的计算结果

Fig.6 Results calculated by improved formula

表2 双波段 C_n^2 测量结果对比

Table 2 Comparison of C_n^2 by dual-band

Nmuber	Classical	Proposed
1	43.01%;60.23%	80.47%;87.54%
2	40.40%;54.55%	81.24%;89.03%
3	32.21%;50.90%	80.26%;86.13%
4	37.07%;53.44%	80.28%;85.37%
5	35.07%;67.37%	82.92%;88.22%
6	47.88%;52.26%	82.19%;89.76%

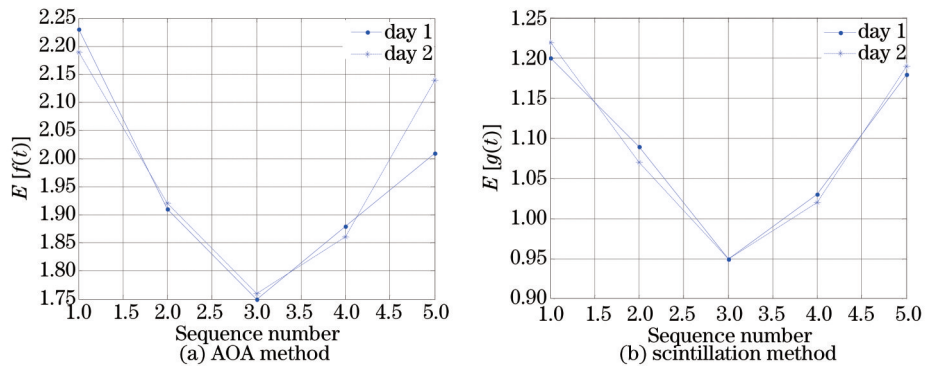


图7 拟合均值结果比较

Fig.7 Results calculated by improved formula

$f(t)$ 的拟合均值比较结果,图7(b)为对 $g(t)$ 的拟合均值比较结果。

从图7可以看出,两实验日各自拟合出的 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的均值相差很小,数据拟合效果稳定,随着实验数据的不断积累,今后可通过系数平均方式,进一步提高一段时期内 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的准确性。

5 结 论

提出了采用双波段激光,验证不同 C_n^2 估算模型的方法,并在船用激光通信系统的实际应用环境中进行了实验。结果表明,根据到达角起伏方差对 C_n^2 进行测量的结果,在同一大气环境条件下,其一致性低于采用闪烁指数的测量结果,这一结论也与 Andrew 所提理论相一致。根据实验结果,修正了估算模型,提出了能够定量评估大气湍流强弱的方法,该方法在量化短时间内、同一环境下的大气湍流强度方面有很好的 consistency。所提出的方法已应用于某大气激光通信实验系统中,作为定量评价所处海域大气湍流强弱的标准。

参 考 文 献

1 Mohamed Abaza, Racd Mesleh, Ali Mansour, *et al.*. Spatial diversity for FSO communication systems over atmospheric turbulence

- channels[C]. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014: 382-387.
- 2 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.
钱 锋, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
- 3 Probhmandeep Kawr, Virander Kumer Jain, Subrat Kar. Performance analysis of FSO array receivers in presence of atmospheric turbulence[J]. Photonics Technology Letters, 2014, 26(12): 1165-1168.
- 4 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡 源, 丁 莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- 5 Henniger H, Epple B, Haan H. Maritime mobile optical-propagation channel measurements[C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2010: 1-5.
- 6 Chen Chunyi, Yang Huamin, Tong Shoufeng, *et al.*. Measurement experiment and analysis of laser atmospheric structure constant of refractive index[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(supplement): 422-426.
陈纯毅, 杨华民, 佟首峰, 等. 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(增刊): 422-426.
- 7 Stell M F, Moore C I, Burris H R. Passive optical monitor for atmospheric turbulence and windspeed[C]. SPIE, 2004, 5160: 422-431.
- 8 Gao Chong, Tan Liying, Ma Jing, *et al.*. Experimental research of angle-of-arrival fluctuations in free-space optical communications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 2(2): 177-181.
高 宠, 谭立英, 马 晶, 等. 空间光通信的到达角起伏实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 2(2): 177-181.
- 9 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Comparison of refractive index structure constants of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(4): 538-542.
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 利用闪烁和漂移效应测量大气折射率结构常数的对比分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 538-542.
- 10 Wu Xiaoqing, Hiang Honghua, Qian Xianmei, *et al.*. Thermosonde measurement of temperature structure parameter and temperature spectral power-law exponent profile in the lower stratosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 14(5): 0501001.
吴晓庆, 黄宏华, 钱仙妹, 等. 低平流层下温度结构常数和温度起伏谱幂率廓线的探空测量[J]. 光学学报, 2014, 5(5): 0501001.
- 11 Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Atmospheric parameters measurements for non-Kolmogorov turbulence with Hartmann-shack wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(9): 1201-1207.
饶长辉, 姜文汉, 凌 宁. 应用哈特曼-夏克波前传感器测量大气湍流参数[J]. 光学学报, 2000, 20(9): 1201-1207.
- 12 Andrews Larry C, Phillips Ronald L. Laser Beam Propagation Through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998: 199-210.
- 13 Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, *et al.*. Precise position measuring system for laser spots[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 841-848.
黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 841-848.
- 14 Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 37(2): 151-172.
- 15 Candes E J, Romberg J K. Practical signal recovery from random projections[C]. SPIE, 2005, 5674: 76-86.
- 16 Babcock H W. The Possibility of Compensating Astronomical Seeing[M]. San Francisco: Publication of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65(386): 229-236.
- 17 Carasso A S. Direct blind deconvolution[J]. Appl Math, 2001, 61(6): 1980-2007.

栏目编辑: 史 敏