

基于无线光通信的舰船三维变形测量方法

赵芳¹, 张骁², 赵建军¹, 杨利斌¹

¹海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001;

²海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001

摘要 无线光通信(FSO)因其高速便捷、抗电磁干扰能力强的优势得到了越来越多的关注,成为军民领域的研究热点。提出了一种舰船三维变形测量方法,利用 FSO 技术设计了时统单元,使系统的光学结构可以同时实现舰船三维变形角的测量、接收单元的光学成像激励和测量结果的授时。对系统的结构和关键电路的设计进行阐述,并结合数据仿真对系统误差进行分析。结果表明,该测量方法在理论上具有可行性,不仅满足测量精度要求,并且具有更低的硬件复杂度和更高的可用性,有望应用于实践中。

关键词 测量; 无线光通信; 船体变形; 光学测量; 驱动电路; 大气湍流; 大气衰减

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0404003

3D Ship Deformations Measurement Method Based on Free-Space Optical Communication

Zhao Fang¹, Zhang Xiao², Zhao Jianjun¹, Yang Libin¹

¹Department of Armament Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;

²Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract Free-space optical communication (FSO) has attracted more and more attention because of its advantages of high-speed, convenience and strong ability of anti-electromagnetic interference, and has become a research hotspot in military and civilian fields. A method of 3D ship deformation measurement is proposed. A time unit is designed by FSO technology. The optical structure of system can realize the measurement of 3D ship deformation angle, the stimulation of optical imaging of receiving unit and the timing of measurement results at the same time. The structure of the system and the design of key circuit are represented. The system error is analyzed with data simulation. The results indicate that this measurement method is theoretically feasible, and not only meets the measurement precision, but also has lower hardware complexity and higher availability. It is potential to be used in practice.

Key words measurement; free-space optical communication; ship deformations; optical measurement; drive circuit; atmospheric turbulence; atmospheric attenuation

OCIS codes 120.3930; 010.1330; 060.4510; 060.2605

1 引 言

现代舰船装备了越来越多的高精尖武器系统,由于舰船不是一个绝对的刚体,在各种内外因素的共同作用下,其船体会产生三维变形^[1]。大量的实验分析

结果表明,舰船变形严重影响了武器系统的作战效能^[2]。为了提高舰载武器的作战效能,对舰船的三维变形进行实时、准确的测量和补偿是十分必要的。

常用的舰船三维变形的测量方法包括全球定位系统(GPS)测量法^[3-4]、应变传感器测量法^[5-6]和惯

收稿日期: 2017-08-07; 收到修改稿日期: 2017-10-09

作者简介: 赵芳(1990—),女,博士研究生,主要从事武器系统标校和数据处理方面的研究。E-mail: 580119362@qq.com

导师简介: 赵建军(1965—),男,博士,博士生导师,主要从事武器装备与作战指挥一体化技术、武器系统标校方面的研究。E-mail: 1079173362@qq.com

性器件测量法^[7-8]等非光学测量方法,以及偏振光能量测量法^[9]、大钢管测量法^[10-11]、摄像测量法^[12-14]和星敏感器测量法^[15]等光学方法。文献[16]对各测量方法进行了对比总结,结果表明,光学测量方法的结果不受舰船航行条件、气象状况等因素的影响,测量精度与非光学方法相比也具有明显的优势,其中基于自准直原理的测量方法^[17]精度更是达到了角秒级。但该测量方法仅适用于二维角度的测量,对横扭角的测量能力有限,在此基础上,基于准直共轭光学结构的测量系统^[16,18]利用光学成像定位算法解算出横扭角,实现了舰船三维变形测量。

但目前的光学测量方法都存在硬件过于复杂的缺陷,有的测量方法还需要安装笨重的光学通道^[10-11,16,18],且大多数测量方法都采用计算机外接

同步线或用 GPS 接收机作为时统单元^[16,18]的时间同步方法,不仅增加了布线的复杂和使用的不便, GPS 信号也易与舰船上的无线电探测设备信号相互产生干扰,如若在重要演习过程中,要求舰船保持“无线电静默”的状态下,该授时单元就会失效。

本文基于准直共轭的光学测量原理,提出了一种基于无线光通信(FSO)的舰船三维变形测量方法,并结合数据仿真进行了系统误差分析。

2 基于 FSO 的舰船三维变形监测系统

2.1 舰船三维变形测量的实现

基于 FSO 的舰船三维变形测量系统的设计组成如图 1 所示,基于图 1 所示的系统组成,结合数据仿真说明三维变形测量的实现过程。

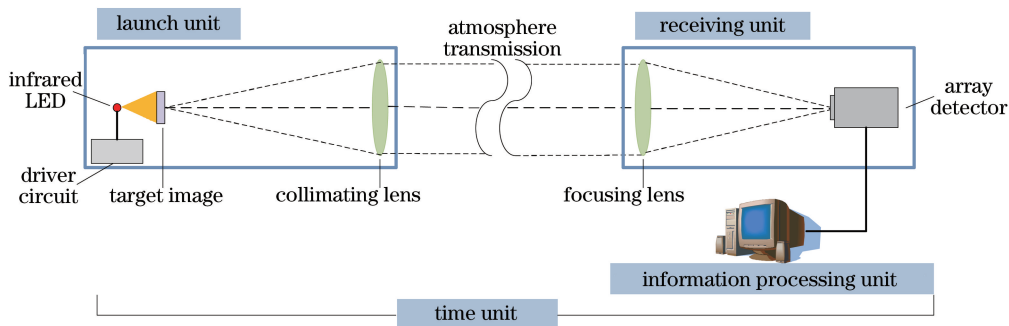


图 1 基于 FSO 的舰船三维变形测量系统的组成

Fig. 1 Composition of 3D ship deformation measurement system based on FSO

发射单元的红外 LED 光源照射在投影目标上,光束通过光学系统(其中包括一段大气传播)在探测器上成像,对该过程进行仿真,如图 2 所示。

以十字线目标为例,设理想的十字线的纵横线的二值函数分别为^[16]:

$$I_1(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x-x_0}{a}\right) = \begin{cases} 1, & |x-x_0| \leq \frac{a}{2}, |y-y_0| \leq \frac{b}{2} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_2(x,y) = \text{rect}\left(\frac{y-y_0}{b}\right) = \begin{cases} 1, & |x-x_0| \leq \frac{b}{2}, |y-y_0| \leq \frac{a}{2} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

式中 a, b 为十字线的长和宽, x_0, y_0 为中心坐标。则十字线的二值函数为:

$$I(x,y) = I_1(x,y) | I_2(x,y), \quad (3)$$

按上述公式进行十字线仿真,如图 2(a)所示。

对十字线图像进行傅里叶变换后,经光学系统的滤波,其空间频谱的分布变为:

$$G_R(f_x, f_y) = \mathcal{F}[I(x,y)]H(f_x, f_y), \quad (4)$$

式中, f_x 和 f_y 分别是沿 x 和 y 方向的空间频谱。

由于光学系统的传递函数与高斯函数相近,因此常常以高斯函数作为调制传递函数来进行滤波仿真,如图 2(b)所示,本研究采用的高斯滤波函数公式为:

$$H(f_x, f_y) = \exp\left[-\frac{\rho^2(f_x, f_y)}{2\rho_0}\right], \quad (5)$$

式中 ρ_0 是该光学系统的截止频率,其大小与光学系统的通光孔径、焦距、光波波长和测量距离等参数设置有关, $\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 是空间频率。

再经傅里叶逆变换,将其灰度分布扩展到 $0 \sim 2^n$ 的灰度空间中,从而完成在探测器上的成像,如图 2(c)所示,其中 n 为探测器象元的深度,设 n 值为 8 bit。从图 2 可以看出,通过二维空间的低通滤波后,十字线的边缘的分布变缓。

测量系统的发射单元和接收单元分别位于舰船变形测量的参考点和测量点,当舰船产生三维变形时,接收单元的坐标系会相对产生偏移和旋转。定义投影目标(发射端和接收端)的中心为坐标系原点,投影目标的纵向为 x 轴,横向为 y 轴,垂向为 z

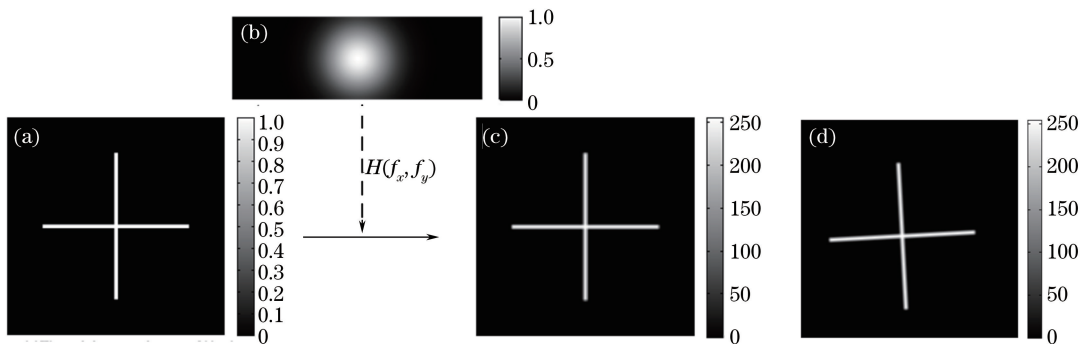


图 2 十字线创建过程仿真。(a)原始十字线图像;(b)高斯滤波;(c)探测器上十字线图像;(d)加入三维变形角后的十字线图像

Fig. 2 Simulation of cross creation process. (a) Original cross image; (b) Gaussian filter; (c) cross image on the detector; (d) cross image after adding 3D deformation angles

轴,三轴关系满足右手定则。引入三维变形角 (α, β, γ) ,分别对应坐标系 x 轴、 y 轴和 z 轴的相对位移,称为舰船的艏绕角、纵绕角和横扭角。以横扭角为例,坐标系绕 z 轴转过 γ 角度,如图3所示。

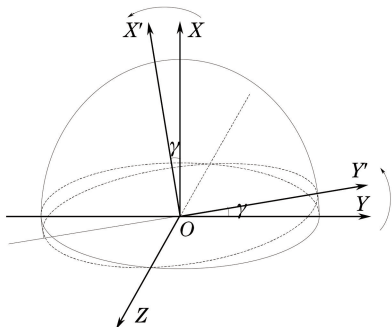


图 3 舰船横扭角对图像坐标系的影响示意图

Fig. 3 Schematic of influence of the roll angle of ship on the image coordinate system

在准直物镜和聚焦物镜焦距相同的情况下,设发射端投影目标坐标为 (x, y, z) ,在接收端成像的坐标为 (x', y', z') ,不考虑系统误差有:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\gamma) & \mathbf{T}(\alpha, \beta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma \\ \gamma & 1 \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵, $\mathbf{T}(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} -\beta f \\ \alpha f \end{bmatrix}$ 为平移矩阵, f 为物镜的焦距。由(6)式可以看出,舰船的横扭变形角 γ 的作用是使目标图像产生旋转,艏绕角 α 和纵绕角 β 的作用是使图像产生平移,且平移的大小与物镜的焦距有关。则目标图像在系统存在三维变形角的状态下,在探测器上成像如图2(d)所示。

最后进行图像的定位,艏绕角和纵绕角由图像中心坐标位移(或某点相对初始时刻的位移)求解,

横扭角由图像中各行列直线方程的倾斜角求解,从而实现三维变形角的测量。

2.2 基于 FSO 的时统单元的实现

光源采用 830 nm 波段的红外 LED,由于红外光比可见光的背景噪声小,不易干扰,可工作在室内外全天候的大气环境,因此接收端和发射端之间不需搭建特殊光通道,可以节约成本。

以红外光 LED 传输时间信号,其具体实施步骤为:

1) 时间信息通过编码器发送给红外光 LED 驱动电路,驱动电路通过编码控制光源的闪烁,亮表示“1”,灭表示“0”;

2) 接收单元采用红外镜头照相机,前端加装滤光片,并以 100 frame/s 的速度连续拍照,解码完成光信号到数字信号的转换,设定灰度阈值,大于阈值为“1”,小于阈值为“0”,处理图像以得到数字信号,解码出时间信息;

3) 舰船三维变形周期一般为 3~10 s^[1],根据奈奎斯特采样定理,1 Hz 的检测频率得到的测量结果完全能够保留舰船完整的变形信息,编码时在时统信息前加入帧同步定位信息,码字规定为“0011011”,选取定位信息中最后一位“1”对应的图像,解码时统信息,得到图像和时间的二维列表,传输至信息处理单元,进行三维变形角的解算。

由上述步骤可知,要实现基于 FSO 的时统单元,最主要的是其 LED 驱动电路的设计。目前的 LED 驱动电路多数用来实现照明或提供屏幕背光,其开关频率、电压和电流等指标无法满足时间信息传递的需求。因此需要设计一个高速、稳定和可靠的 LED 驱动电路,其主要功能是通过控制光源把脉冲信号调制到光信号上,进而将信息辐射出去。基于上述需求,设计恒流源驱动电路如图 4 所示。

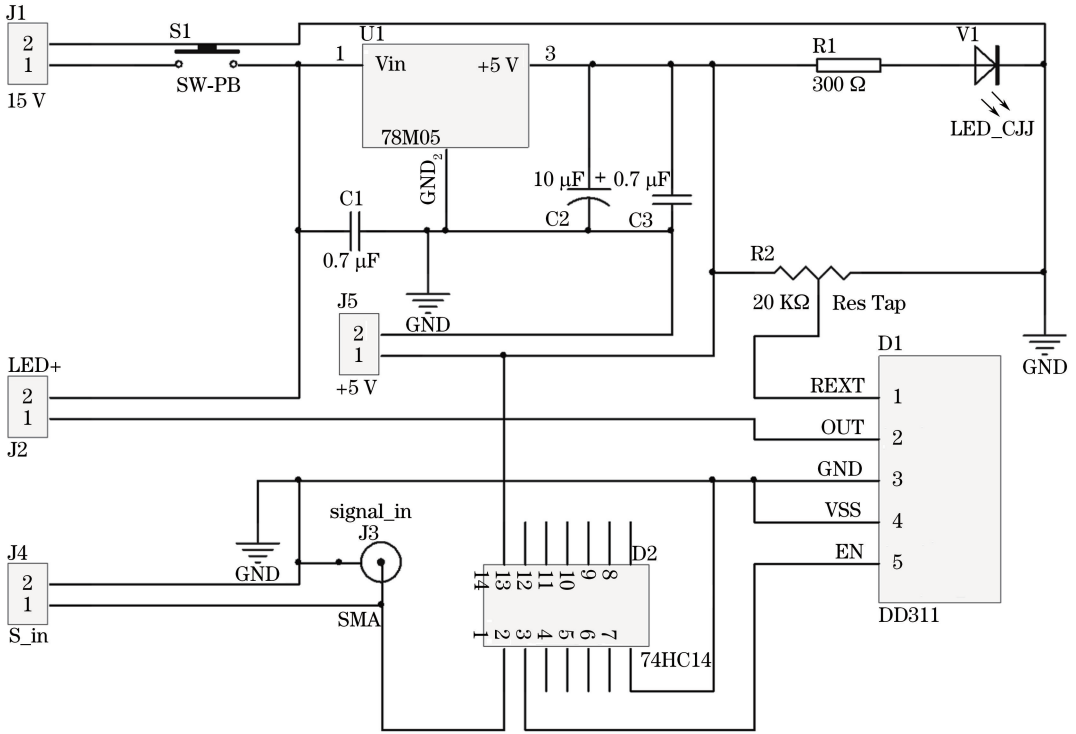


图 4 驱动电路原理图

Fig. 4 Schematic of driving circuit

图 4 为基于单通道 LED 恒流驱动芯片设计的驱动电路原理图,其中, J1、J2、J3、J4 和 J5 为排针, DD311 为 LED 驱动芯片。首先,电压转换芯片形成 5 V 的偏压电压,输入参考电流 I_{REF} 的大小由可调电阻 R_2 来进行设定;其次, J2 与 LED 模块的正极和负极连接,其中正极由 J1 接入 15 V 的标准供电,负极与 DD311 的输出端连接;最后,通过对输出端电压高低的控制,调节 LED 正负极的电压差值,进而控制 LED 的亮灭,即实现信息的编码。

另外,数字时间信号(可从舰船时间系统获取)从 J3 或 J4 的射频连接头 SMA 输入,送到 DD311 的使能端以完成判决。由 74HC14 电压比较芯片构成施密特触发器,实现信号的反相,当不输入时间信号时 DD311 输出为高电压,LED 不亮,防止无时间信号时的 LED 常亮。通过这个电路驱动红外 LED 光源发送时间信号,为测量结果提供准确的时间信息。

3 系统误差分析

大气湍流效应和衰减效应是影响无线光传输质量和通信性能的基本形式,分别以大气折射率结构常数 C_n^2 和大气衰减系数 k 作为主要表征量^[19]。

大气湍流效应,是指大气的折射率随着空间和时间做无规则的变化,导致光束漂移(或称为光束抖

动)、光强闪烁(由强度起伏引起)、光束扩展和像点抖动(由到达角起伏引起)等一系列光传输效应^[20-22]。大气湍流对系统的影响主要表现在两个方面:一是图像的模糊和抖动对三维变形角的解算结果造成影响;二是光强的闪烁对时间信息的解码产生影响。

大气衰减效应,是指由大气吸收和散射造成的光功率的损耗。大气衰减对系统的影响主要是透过率过低导致对 FSO 质量产生影响。

本研究针对这两方面进行仿真和系统误差分析。仿真参数设置为:根据文献[23]的实船测量数据设置光传输通道 $L=20$ m,光学设备的通光孔径 $D=100$ mm,物镜焦距 $f=1000$ mm,红外光波长 $\lambda=830$ nm,系统精度设为 $5''$ 。

3.1 近海地区大气湍流特征统计分析

目前,表征大气湍流强度的参量是 C_n^2 ,它随大气湍流的增强而增大。由于 C_n^2 变化规律随机,无法用数学模型进行准确表示,只能通过数据统计探究其规律。

目前在我国近海、热带环境、高原环境和大型城市等 4 个典型地区都建立了测试站,收集大气测试数据。因为舰船三维变形测量系统安装在舰船上,所处环境位于海洋,因此对数据库中的近海 C_n^2 数据进行统计分析。由于篇幅原因,只呈现结论,具体

数据不作展示。

依据近海测试方案,每隔 1 min 记录一次大气折射率结构常数,扣除个别数据失效时段,每个月份的数据采集时间不少于 20 d,记录统计了近海地区一年的 C_n^2 值,如表 1 所示。

表 1 不同季节近海地区 C_n^2 统计情况

Table 1 Statistics of C_n^2 in different seasons in the coastal area

Season	Minimum / ($10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)	Mean / ($10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)	Maximum / ($10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$)
Spring	3.09	6.81	10.4
Summer	0.923	1.93	3.26
Autumn	0.516	1.53	2.82
Winter	1.04	2.25	3.77

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,根据此方法对观测期间近海面大气湍流强度进行划分^[24]:

$$\begin{cases} \text{strong turbulence: } C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3} \\ \text{medium turbulence: } \\ 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3} \\ \text{weak turbulence: } C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3} \end{cases} \quad (7)$$

结合表 1 的统计数据 and (7) 式可知,近海环境的大气主要以中等偏弱强度湍流为主。

3.2 大气湍流对系统测量结果影响的分析

基于系统原理和所设参数进行大气湍流对系统测量结果的误差影响的仿真。创建十字线投影目标的仿真图像,在光学传播中加入预设的三维变形角和大气湍流模拟函数,生成接收端图像,采用亚像素定位算法进行图像定位,并结合最小二乘法实现三维变形角的求解,最后与预设三维变形角作差得到大气湍流对测量结果的影响误差。

数据仿真时采用蒙特卡罗随机相位屏进行大气湍流函数 $\phi(u, v)$ ^[25-26] 的模拟:

$$\phi(u, v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{n,m} \exp[j2\pi(f_{u_n} u + f_{v_m} v)], \quad (8)$$

式中:

$$\langle |c_{n,m}|^2 \rangle = \Phi_\phi(f_{u_n}, f_{v_m}) \Delta f_{u_n} \Delta f_{v_m}, \quad (9)$$

$$\Phi_\phi^{mvK}(f) = 0.023 r_0^{-5/3} \frac{\exp(-f^2/f_m^2)}{(f^2 + f_0^2)^{11/6}}, \quad (10)$$

$$r_0 = (0.423 k^2 C_n^2 L)^{-3/5}, \quad (11)$$

式中 $\Phi_\phi(f_{u_n}, f_{v_m})$ 是服从高斯分布的能量谱密度函数, $\Phi_\phi^{mvK}(f)$ 是 $\Phi_\phi(f)$ 的改进的 von Karman 模型, r_0

是大气相干长度, k 是波矢量, $c_{n,m}$ 为傅里叶系数, f_{μ} 和 f_{ν} 是沿方向 μ 和 ν 的空间频谱, Δf_{μ} 和 Δf_{ν} 是沿方向 μ 和 ν 的频谱宽度, f_m 和 f_0 为常数。

通过仿真计算得到 C_n^2 与舰船三维变形角误差标准差之间的关系如图 5 所示。

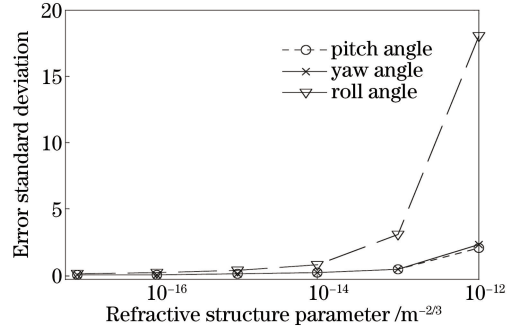


图 5 不同大气湍流强度下三维变形角的误差标准差
Fig. 5 Error standard deviation of 3D deformation angles under different atmospheric turbulence intensities

由图 5 可知,三维变形角误差标准差在大气湍流强度到达一定数量级后呈指数增长。在 C_n^2 达到 $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 时,横扭角和纵绕角的误差标准差不超过 $3''$,而横扭角却达到 $18''$ 。这说明横扭角测量结果受大气湍流的影响远大于纵绕角和纵绕角。当大气湍流强度被抑制在 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,得到的三个变形角的误差标准差都小于 $1''$,符合测量系统的测量精度要求。由此可见,当大气湍流在 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 数量级甚至更小时,大气湍流对三维变形测量结果的影响是可以忽略的。

根据表 1 的统计数据可知,近海地区的大气折射率结构常数的均值基本维持在 $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 的数量级上,因此大气湍流对该系统的影响是可以忽略的。

3.3 大气湍流对时统单元影响的分析

光强闪烁是指发射光束由于空气折射率的随机变化导致接收相位的随机变化,进而使得光束强度忽大忽小,亮度也忽明忽暗。根据 2.2 节时统单元的实施步骤,接收端是通过设定灰度阈值进行时间解码,因此光强闪烁有可能造成误码。基于系统原理和所设参数进行大气湍流对时间信息解码影响的仿真。

光强闪烁的大小常用闪烁指数 σ_I^2 来描述,对于水平均匀路径以及给定波长和传输距离的情况下,常用 Rytov 方差 σ_I^2 来描述,其表现形式为^[27]:

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (12)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为光波波数。

为了使结果更具普遍性,统计 3.1 节 C_n^2 数据库 1~12 月份的日平均值的最大和最小值如图 6(a) 所

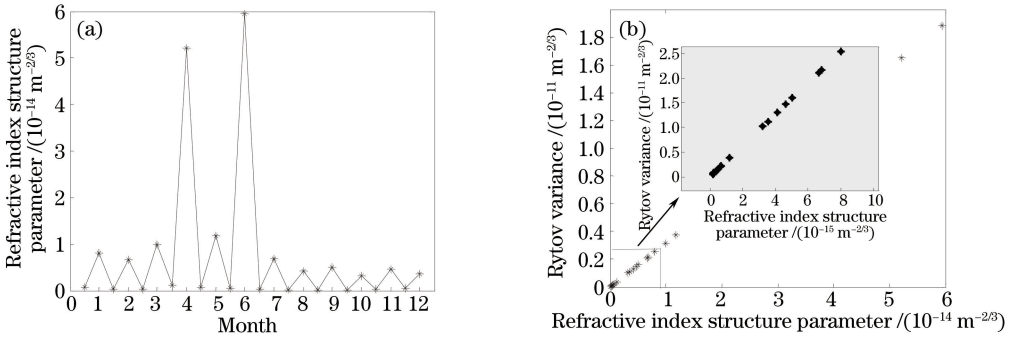


图 6 基于 C_n^2 月平均值的 Rytov 方差计算结果。(a) 1~12 月份的 C_n^2 统计结果;(b) Rytov 方差
Fig. 6 Calculation result of Rytov variance based on C_n^2 monthly average value.

(a) Statistical results of C_n^2 from January to December; (b) Rytov variance

示,横轴为月份,数据点对应每月 C_n^2 日平均值的最大和最小值,并将此统计结果代入(12)式中计算 σ_1^2 ,结果如图 6(b)所示。

由图 6 可以看出,光强闪烁指数的值基本在 10^{-10} 的数量级上,变化幅度在一年之内都很小,推及一天内直至一个解码周期内更是非常微小,因此系统在使用时不需要根据大气的气象状况对解码的灰度阈值设定进行调整。

3.4 大气衰减误差影响分析

一束波长为 λ 的红外光透过厚度为 L 的大气时会产生衰减,其透过率^[28]可以表示为:

$$\tau = \exp(-k_e L), k_e = k_a + k_s, \quad (13)$$

式中 k_e 为衰减系数, k_a 为单位路径长度的吸收系数, k_s 为单位路径长度的散射系数。由文献[19, 29]可知,大气衰减系数的计算公式与大气粒子半径和红外波长的大小关系有关:

$$k_s^{\text{Ray}} = 1.09 \times 10^{-3} \times \lambda^{-4.05} \quad b \ll \lambda, \quad (14)$$

$$k_s^{\text{Mie}} = \frac{\ln(1/\eta)}{R_v} \left(\frac{550}{\lambda} \right)^q, \quad b \approx \lambda, \quad (15)$$

$$k_e^{\text{rain}} = 1.076R^{2/3}, \quad b \gg \lambda, \quad (16)$$

式中 b 为散射粒子的半径(μm); λ 为波长(此处为 830 nm); R_v 为大气能见度(km); η 为亮度对比的视

觉阈值,在此处模型中取 2%; R 为降雨速率(mm/h)。(14)式为红外光在晴朗天气中的瑞利散射系数,(15)式为非晴朗天气中的米散射系数,(16)式为雨雪天气下几何光学散射系数(或消光系数)。

在(15)式的模型里, q 表示为:

$$q = \begin{cases} 1.6, & R_v > 50 \\ 1.3, & 6 < R_v \leq 50. \\ 0.585R_v^{1/3}, & R_v \leq 6 \end{cases} \quad (17)$$

根据(14)~(16)式,就大气衰减对时统单元的影响按照如下三个方面进行讨论:

1) 晴朗天气下,显然光学测量系统的测量效果最好。此时,对系统最大的影响因素是大气湍流效应和大气分子的吸收作用[根据(14)式,晴朗天气下 830 nm 红外光的散射作用可以忽略]。

利用 MODTRAN 软件,结合近海的场景,将 MODTRAN 设置为:大气模式分别为中纬度夏季和冬季,大气路径的类型为水平链路,路径长度设为系统的光学传输通道 $L = 20$ m,运行方式为透过率,观测位置的海拔高度为 60 m(涵盖了设备安装的高度),波长设置为红外波段。图 7 为中纬度的夏季和冬季,近海岸环境下大气分子对红外波段的吸收情况。

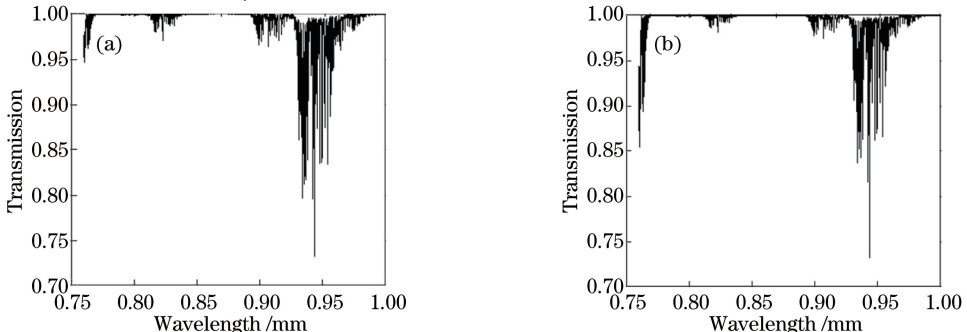


图 7 中纬度(a)夏季和(b)冬季红外波段的大气吸收情况

Fig. 7 Atmospheric absorption of infrared wave band in mid-latitude (a) summer and (b) winter

从图 7 中可以得到,在所设条件下 $\lambda = 830 \text{ nm}$ 波长的透过率分别为 0.9975 和 0.9993,可知系统的红外光束在晴朗天气下的衰减非常小,可以忽略不计。由于低空红外吸收的主要大气成分是 H_2O 和 CO_2 ,夏季的湿度较大,因此夏季的透过率略低于冬季的透过率,与仿真结果一致。

2) 在非晴朗天气下,大气衰减主要体现为散射作用,根据(13)式和(15)式取 $\lambda = 830 \text{ nm}$ 对衰减系数进行计算,得到不同天气状况下的大气能见度和透过率如表 2 所示。

表 2 不同天气状况下的大气能见度和透过率
Table 2 Atmospheric visibility and transmittance under different weather conditions

Visibility rating	Weather condition	Atmospheric visibility /km	Transmittance
0	Dense fog	<0.05	<0.311
1	Thick fog	0.05-0.2	0.311-0.757
2	Moderate fog	0.2-0.5	0.757-0.9
3	Light fog	0.5-1	0.9-0.951
4	Mist	1-2	0.951-0.977
5	Haze	2-4	0.977-0.989
6	Light haze	4-10	0.989-0.996
7	Clear	10-20	0.996-0.998
8	Sunny	20-50	0.998-0.999
9	Very sunny	>50	>0.999

表 2 中的不同天气状况按照大气能见度等级划分^[30],可以看到由于系统的光传输距离较短(20 m),在一般雾霾天气(对应能见度大于 0.2 km,即能见度等级为 2~9 的天气状况),都有较好的透过率,保证了无线光传输不受影响。

3) 在雨雪等恶劣天气下,粒子的散射一般被看做几何光学散射,如(16)式所示,认为其衰减系数是独立于波长的,主要与沉淀物的速率(即降雨/降雪速率)有关。

4 结 论

提出了一种基于 FSO 的舰船三维变形测量方法,不仅继承了光学测量方法的精度优势,也克服了光学测量方法硬件复杂、安装和使用不便的缺点。

1) 利用 FSO 技术进行系统的授时,设计了驱动电路,取代了传统的布设同步线或用 GPS 授时的方法,不仅降低了设备的复杂度,并且不会与舰船上的电磁设备互相干扰。

2) 由 3.1 和 3.2 节可知,该三维变形测量设备在舰船上使用时,大气湍流造成的系统误差符合测

量精度要求,因此不需要对光学通道施加保护措施。

3) 由 3.3 节可知,系统基于 FSO 的授时方法是可靠的,大气湍流不会造成通信的误码,从公式来看是由于系统的光传输距离很短,在此距离上的大气湍流的光强闪烁影响可以忽略。

4) 目前的舰船变形角光学测量设施,主要应用于舰船的实验、测试和标校中,根据通常的实验和标校规程,为确保结果的准确度,对海上的温度和气象条件都有要求,应在稳定温度和简单气象条件下进行,由 3.4 节可知,在晴好天气或一般雾霾天气下,由于系统的光传输距离很短,大气衰减的影响可以忽略。

5) 此外,在浓雾、极浓雾(对应能见度小于 0.2 km,即能见度等级为 0~1 的天气状况)或雨雪等恶劣的天气条件下,不应在舰船甲板使用该系统进行实验或标校作业。如果系统应用于长期的船体变形监测中,为了应对各种复杂环境,应该对光学通道进行硬件保护。

进一步地,通过增加图像灰度、提高图像定位算法精度等软件方法,也有助于抑制大气湍流误差、提高系统测量精度和该方法的可用性。

参 考 文 献

- [1] Luan Y N, Jiang Y W. Measurement and analysis of ship deformation[J]. Ship Argumentation, 2003(3): 17-22.
- [2] 栾永年, 姜亚伟. 船体变形测量与分析[J]. 舰船考证参考, 2003(3): 17-22.
- [3] Day D L, Arruda J. Measuring structural flexure to improve precision tracking [R]. DTIC Document, 1996.
- [4] Petovello M, Lachapelle G, Cannon M E. Using GPS and GPS/INS systems to assess relative antenna motion onboard an aircraft carrier for shipboard relative GPS [C]. Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2005: 219-229.
- [5] Petovello M G, O'Keefe K, Lachapelle G, et al. Measuring aircraft carrier flexure in support of autonomous aircraft landings[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 523-535.
- [6] Kageyama K, Kimpara I, Suzuki T, et al. Smart marine structures: an approach to the monitoring of ship structures with fiber-optic sensors[J]. Smart Materials and Structures, 1998, 7(4): 472-478.
- [7] Pran K, Johnson G, Jensen A E, et al.

- Instrumentation of a high-speed surface effect ship for structural response characterization during sea trials [C]. SPIE, 2000, 3986: 372-379.
- [7] Lu Y, Cheng X. Random misalignment and lever arm vector online estimation in ship-borne aircraft transfer alignment[J]. Measurement, 2014, 47: 756-764.
- [8] Chattaraj S, Mukherjee A, Chaudhuri S K. Transfer alignment problem: algorithms and design issues[J]. Gyroscopy and Navigation, 2013, 4(3): 130-146.
- [9] Astheimer R W, Daley W J. Two axis autocollimator using polarized light: US23602562A [P]. 1967-05-02.
- [10] Liu X M, Zhang Y Y, Feng X Y, *et al.* A novel method for hull's three dimensional deformation measurement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 344: 93-98.
- [11] Li M, Zhang Y Y, Li Y, *et al.* Research of angle distortion for measuring ship [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2006, 29(3): 14-15.
李岷, 张尧禹, 李岩, 等. 基于测量船角变形光电测量系统的研究[J]. 长春理工大学学报, 2006, 29(3): 14-15.
- [12] Shang Y, Yu Q, Yang Z, *et al.* Displacement and deformation measurement for large structures by camera network [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 247-254.
- [13] Chen B Q, Garbatov Y, Soares C G. Measurement of weld-induced deformations in three-dimensional structures based on photogrammetry technique[J]. Journal of Ship Production and Design, 2011, 27(2): 51-62.
- [14] Yu Q, Fu S, Jiang G, *et al.* Pose-relay videometric method and ship deformation measurement system with camera-series[C]. International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2010: 1-5.
- [15] Zhan D J, Zheng J X, Zhang Z H, *et al.* Dynamic calibration method for shipboard SINS/CSS system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(5): 1-6.
战德军, 郑佳兴, 张忠华, 等. 弹性安装船用星惯组合导航系统安装角动态标校方法[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 1-6.
- [16] Gao Y. Research on key technologies of 3D ship deformations measurement based on collimated conjugated optical structure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
高旻. 基于准直共轭光学结构的舰船三维变形测量关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- [17] Yuan J, Long X, Yang K. Temperature-controlled autocollimator with ultrahigh angular measuring precision [J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(12): 125106.
- [18] Gao Y, Wang X, Wu W, *et al.* Method for estimating the impact of atmospheric turbulence on 3D angular deformations measurement [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(17): 4855-4859.
- [19] Li B F. Research on atmospheric channel characteristics of ultraviolet communication in coastal area [D]. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015.
李笔锋. 近海岸紫外光通信大气信道特性研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2015.
- [20] Wu X J, Wang H X, Li B F, *et al.* Affect analysis of atmospheric turbulence on fading characteristics in free-space optical system over different environments [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0513001.
吴晓军, 王红星, 李笔锋, 等. 不同传输环境下大气湍流对无线光通信衰落特征影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0513001.
- [21] Han L Q, You Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0706004.
韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706004.
- [22] Xing J B, Xu G L, Zhang X P, *et al.* Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1850-1852.
邢建斌, 许国良, 张旭莘, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1850-1852.
- [23] Jiang G W. Study on pose relay video-metrics method with camera-series and ship deformations measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [24] Ke X Z, Zhang Y. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106001.
柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106001.
- [25] Welsh B M. Fourier-series-based atmospheric phase screen generator for simulating anisoplanatic geometries and temporal evolution[C]. International

- Society for Optics and Photonics, 1997: 327-338.
- [26] Feng F, Li C W. Simulation of atmospheric turbulence phase screen based on wavelet analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0101004.
丰帆, 李常伟. 基于小波分析的大气湍流相位屏模拟 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0101004.
- [27] Gao C, Yu S Y, Ma J, *et al.* Beam wander in moderate to strong turbulence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1597-1601.
高宠, 于思源, 马晶, 等. 强湍流区的光束漂移 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1597-1601.
- [28] Kou R K, Wang H Y, Wu X M. Atmospheric transmittance at infrared band in low latitude areas [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010102.
寇人可, 王海晏, 吴学铭. 低纬度地区红外波段大气透射率研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010102.
- [29] Song W, Shao L, Wang Y F. Calculation of atmospheric infrared absorption transmittance in different vertical heights [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(3): 14-17.
宋伟, 邵立, 汪亚夫. 不同垂直高程大气红外吸收透过率的计算 [J]. *光电技术应用*, 2011, 26(3): 14-17.
- [30] Sheng P X, Mao J T, Li J G, *et al.* Atmospheric physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2013.
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.