

文章编号 1004-924X(2013)09-2421-09

车载经纬仪数据处理

盛磊^{1,2}, 吴志勇^{1*}, 刘旨春¹, 高策¹, 张世学¹, 王世刚³

(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 100039;

3. 吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130022)

摘要:为了保证车载经纬仪的测角精度, 补偿站位及船摇误差, 分析了车载设备的姿态数据对测角误差的影响并建立了船摇误差模型。根据该模型提出了设备标定及测量方案, 并给出了车载设备站位修正及事后数据处理方法。首先, 建立船摇误差模型, 分别给出航向、俯仰及横滚测量误差对设备方位角和俯仰角的影响公式; 结合测量设备指标及任务要求, 制定了标定及测量方案, 给出了设备能够保证精度的测角范围。然后, 提出了在车载设备特殊使用环境下, 站位数据的测量方法及相应的站位船摇修正算法。最后, 说明了车载光测设备的测量数据事后处理方法。实验结果表明, 在车载精确姿态测量系统最大误差为航向角 $1.2'$, 纵倾角 $24''$, 横倾角 $24''$ 的条件下, 设备的测角误差均方根为方位 $\leq 57''$, 俯仰 $\leq 34''$, 基本达到了在该测量条件下的理论最优测角精度。

关键词: 车载经纬仪; 测角误差; 站位误差; 船摇; 数据处理

中图分类号: U674.82; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2421

Data processing for shipboard theodolite

SHENG Lei^{1,2}, WU Zhi-yong^{1*}, LIU Zhi-chun¹, Gao Ce¹, ZHANG Shi-xue¹, WANG Shi-gang³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

3. *College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

* *Corresponding author, E-mail: sljlu@163.com*

Abstract: To ensure the angle measuring accuracy of a shipboard theodolite, and to compensate the errors of the station position and ship-swaying measurement, the effect of attitude data on angle measuring errors was analyzed and a ship-swaying error model was established. On the basis of the model, a scheme for calibrating and measuring the equipment was given, and then a shipboard stations position correcting algorithm and data post-processing method were proposed. First, the ship-swaying error model was build, and the formulas for the effects of measuring errors from the ship's head, pitch and the roll on measured azimuth and elevation angles of the equipment were given. Combined with the equipment indicators and mission requirements, a scheme for calibrating and measuring was established and the measured angle ranges to ensure the accuracy of the equipment were given. Furthermore, a measuring method of station position and its correcting method were proposed when the equipment

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-02-27.

基金项目: 中国科学院三期创新工程和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所内创新工程资助项目 (No. Y10532B110)

works at special working environments. Finally, a data post-processing method for shipboard equipment was explained. Experimental results show that the Root Mean Square(RMS) of angle measuring errors of the equipment are less than $57''$ for the azimuth, less than $34''$ for the pitch when the shipboard accurate attitude measurement system has angle measuring errors at the head of $1.2'$, pitch of $24''$ and the roll of $24''$, respectively. The result has basically reached the optimal theoretical accuracy under this measurement conditions.

Key words: shipboard theodolite; angle measuring error; position error; ship-swaying; data processing

1 引言

船载经纬仪作为一种特殊的不落地光测设备,具有高机动性,以及不受海洋环境限制等诸多优势。近年来,我国武器装备的机动性越来越强,测量精度要求不断提高,因此,高精度船载光测设备的研制成为一种必然趋势。

以往的上舰经纬仪,多用于标定船上其它设备(如导航器件等)的精度^[1-2],而船载靶场光测经纬仪则是用来测量外弹道数据的光测设备,故其具有较高的精度指标要求。与一般的不落地测量设备不同,船载光测设备不仅需要测量及修正平台的变形误差,还需要实时测量并输出站位和船姿等数据。而这些实测数据不能直接应用,要进行相应变换,这一过程又引入了测量设备的安装误差和数据变换误差,这就使船载光测设备的误差模型比普通车载设备的复杂一些^[3]。同时,由于实际项目经费的限制,需要平衡各个辅助测量设备(用于定位及变形测量等)的精度要求,这就需要根据实际工程的应用情况,在透彻分析误差影响的情况下,保证主要(对测角精度影响较大)测量设备的精度,并对测量数据进行分析 and 处理,以满足整个工程的测量精度指标。

本文根据某船载经纬仪工程项目的实际需求,通过分析船载设备特有的姿态数据(航向、俯仰及横滚)对光测设备测角误差的影响,建立了误差模型。目前针对不落地测量(船载)设备提出的误差公式经过简化后为单一自变量,而该模型则综合计算了全部 3 个姿态数据和 2 个实时测量数据变量,从而能更精确地反映姿态测量误差对测角精度的影响。通过分析该模型,结合实际姿态测量精度,在载船系泊状态下(相对稳定)计算出最优精度测量范围,在此范围内设定陆上方位标,标定船载设备的方位零点。实际任务时,通过任务参数(海况,目标距离,精度指标等)分析得到保证任务精度的测量范围,在该范围内可满足预设

指标。本文还提出了一个针对船载设备的站位数据测量修正方法,通过该算法计算得到视轴中心点位置,其精度对设备测角精度的影响可近似为零。最后,本文提出了船载光测数据事后处理方法来依次修正设备误差,旋转姿态变换及数据平滑滤波。实验证明,通过本文提出的一系列方法,可以使船载设备达到理论最优测角精度。该项研究为今后使用更先进的船载姿态测量手段,获得更高的测角精度奠定了基础。

2 误差模型及测量方案

图 1 显示了船载经纬仪的布局,其中 O 点为船体中心,以 O 点为原点,建立船体运动坐标系 $X_c Y_c Z_c$,围绕其坐标轴有横倾、航向和纵倾 3 个姿态角; T 点为经纬仪实际站位点, G_A/G_B 为局部基准(经纬仪项目自购姿态及站位测量设备,由 GPS 与光纤陀螺组成,能完成对经纬仪的测姿与站位测量,其中航向由 GPS 辅助测量,最大误差值:航向 $6'$,横倾 $3'$,纵倾 $3'$;站位由差分 GPS 测量,测量误差为 5 cm ^[4])的前/后天线,其连线与船体 Z_c 轴平行,它的测量定位为 G_A 。为了保证姿态及站位的测量精度,天线 G_A 与 G_B 要放置在空旷处。测量船底层甲板处还有一套精确姿态测量系统(最大误差值为:航向 $1.2'$,横倾 $24''$,纵倾

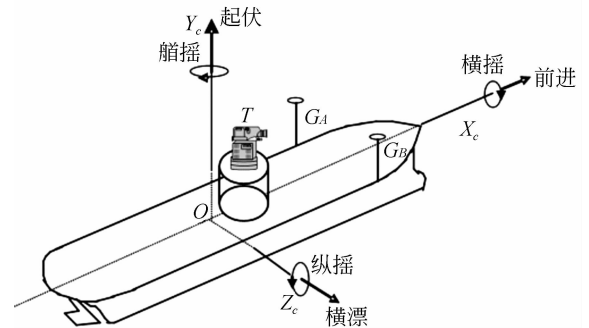


图 1 船载经纬仪布局示意图

Fig. 1 Layout schematic of shipboard theodolite

24'')也能输出相对精度更高的船体姿态数据。

对于船载(及其它动基座)经纬仪,船体运动和平台变形的影响都可统一转化为三维坐标下的 3 个姿态角度的变化,即横倾角 R_i 、航向角 H_i 、纵倾角 P_i 。对于测量数据方位角 A'_i 和 E'_i ,则需要进行坐标旋转变换,由甲板坐标系转化为测站坐标 (CA_i, CE_i) ,变换公式如下^[5-6]:

$$\begin{cases} X_{c_i} = \cos E'_i \cos A'_i \\ Y_{c_i} = \sin E'_i \\ Z_{c_i} = \cos E'_i \sin A'_i \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\mathbf{R}T} \begin{bmatrix} X_{c_i} \\ Y_{c_i} \\ Z_{c_i} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} CA_i = \arctan(Z_i/X_i) \\ CE_i = \arcsin(Y_i) \end{cases}. \quad (3)$$

$\mathbf{M}_{\mathbf{R}T}$ 是船摇反修矩阵,即船摇修正矩阵 $\mathbf{M}_{\mathbf{R}R}$ 的逆矩阵:

$$\mathbf{M}_{\mathbf{R}R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_i & \sin R_i \\ 0 & -\sin R_i & \cos R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P_i & \sin P_i & 0 \\ -\sin P_i & \cos P_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H_i & 0 & \sin H_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin H_i & 0 & \cos H_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{\mathbf{R}T} = \mathbf{M}_{\mathbf{R}R}^{-1},$$

由式(3)展开后分别计算 CA_i 和 CE_i 对 R_i 、 H_i 和 P_i 的偏导数公式,计算并简化后结果如下:

$$\begin{aligned} dCA/dR = & -(\cos(P)\cos(A)\cos(E)\cos(R)\sin(E) - \cos(A)\cos^2(E)\sin(A)\sin(R)) - \sin(P) + \\ & \cos^2(A)\cos^2(E)\sin(P))/(\cos^2(A)\cos^2(E)\cos^2(P)\cos^2(R) - 2\cos^2(A)\cos^2(E)\cos^2(P) + \\ & \cos^2(A)\cos^2(E) - 2\sin(A)\sin(P)\sin(R)\cos(A)\cos^2(E)\cos(P) + \\ & 2\sin(E)\sin(P)\cos(A)\cos(E)\cos(P)\cos(R) - 2\cos^2(E)\cos^2(P)\cos^2(R) + \cos^2(E)\cos^2(P) - \\ & 2\sin(A)\sin(E)\sin(R)\cos(E)\cos^2(P)\cos(R) + \cos^2(P)\cos^2(R) - 1), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} dCA/dP = & ((\sin(E)\sin(R) + \cos(E)\sin(A)\cos(R))(\cos(A)\cos(E)\sin(P) + \\ & \cos(P)\cos(R)\sin(E) - \cos(E)\cos(P)\sin(A)\sin(R)))/(\cos^2(A)\cos^2(E)\cos^2(P) + \\ & 2\cos(A)\cos^2(E)\cos(P)\sin(A)\sin(P)\sin(R) - 2\cos(A)\cos(E)\cos(P)\cos(R)\sin(E)\sin(P) + \\ & \cos^2(E)\sin^2(A)\cos^2(R) + \cos^2(E)\sin^2(A)\sin^2(P)\sin^2(R) - 2\cos(E)\sin(A)\cos(R)\sin(E)\sin^2(P)\sin(R) + \\ & 2\cos(E)\sin(A)\cos(R)\sin(E)\sin(R) + \cos^2(R)\sin^2(E)\sin^2(P) + \sin^2(E)\sin^2(R)), \end{aligned} \quad (6)$$

$$dCA/dH = 1, \quad (7)$$

$$dCE/dR = -(\cos(P)(\sin(E)\sin(R) + \cos(E)\sin(A)\cos(R)))/(1 - (\cos(A)\cos(E)\sin(P) + \cos(P)\cos(R)\sin(E) - \cos(E)\cos(P)\sin(A)\sin(R))^2)^{(1/2)}, \quad (8)$$

$$dCE/dP = (\cos(A)\cos(E)\cos(P) - \cos(R)\sin(E)\sin(P) + \cos(E)\sin(A)\sin(P)\sin(R))/(1 - (\cos(A)\cos(E)\sin(P) + \cos(P)\cos(R)\sin(E) - \cos(E)\cos(P)\sin(A)\sin(R))^2)^{(1/2)}, \quad (9)$$

$$dCE/dH = 0. \quad (10)$$

设姿态测量误差为 TR 、 TP 、 TH ,对测角值的影响为 PA 、 PE ,则误差模型公式为^[7-8]:

$$PA = (dCA/dR)TR + (dCA/dP)TP + (dCA/dH)TH, \quad (11)$$

$$PE = (dCE/dR)TR + (dCE/dP)TP + (dCE/dH)TH. \quad (12)$$

设定 $A \in [0^\circ \sim 360^\circ]$, $E \in [0^\circ \sim 60^\circ]$;以局部基准精度为例设定 $TR=3'$, $TP=3'$, $TH=6'$,选择 4 组 R 、 P 、 H (见表 1 所示),带入式(11)和式(12),计

算结果如表 2、表 3 和图 2、图 3 所示(图中自变量坐标为 A 和 E ,单位为弧度,结果单位为')。

表 1 RPH 选定值

Tab. 1 RPH selected values (°)

R	P	H
3	3	80
-3	3	145
3	-3	235
-3	-3	325

表 2 PA 计算结果

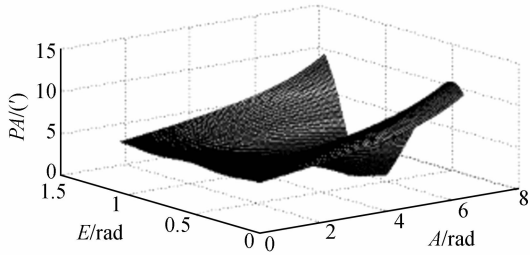
Tab. 2 Calculation results of PA

PA 最大/ ($^{\circ}$)	最大时A/ ($^{\circ}$)	最大时E/ ($^{\circ}$)	PA 最小/ ($^{\circ}$)	最小时A/ ($^{\circ}$)	最小时E/ ($^{\circ}$)
13.37	0	4.8	0.002	331.2	36.6
14.62	0	7.2	0.008	356.4	40.8
12.38	0	7.2	0.002	360	43.8
13.69	0	10.2	0.002	349.2	30.6

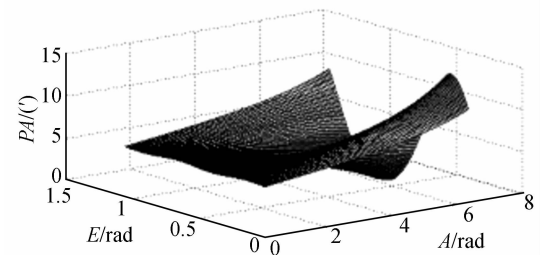
表 3 PE 计算结果

Tab. 3 Calculation results of PE

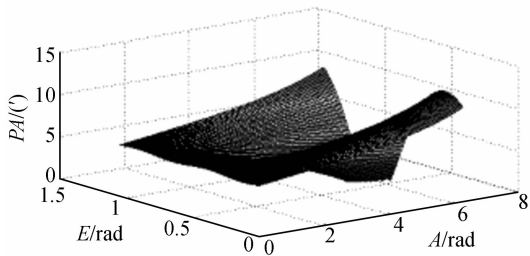
PE 最大/ ($^{\circ}$)	最大时A/ ($^{\circ}$)	最大时E/ ($^{\circ}$)	PE 最小/ ($^{\circ}$)	最小时A/ ($^{\circ}$)	最小时E/ ($^{\circ}$)
4.24	0	22.8	0	129.6	37.8
4.24	140.4	52.8	0.12	0	37.2
4.24	140.4	52.8	0.12	0	7.2
4.24	0	52.8	0	129.6	7.8



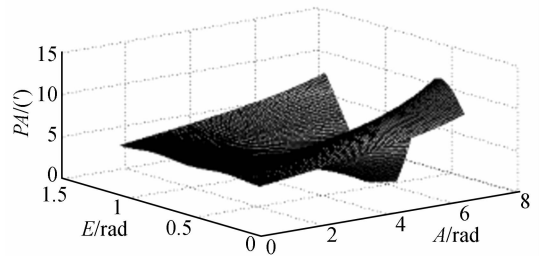
(a) 第 1 组
(a)The first group



(b) 第 2 组
(b)The second group



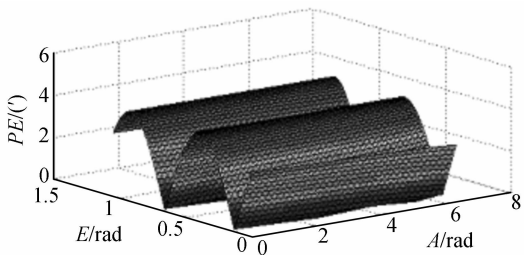
(c) 第 3 组
(c)The third group



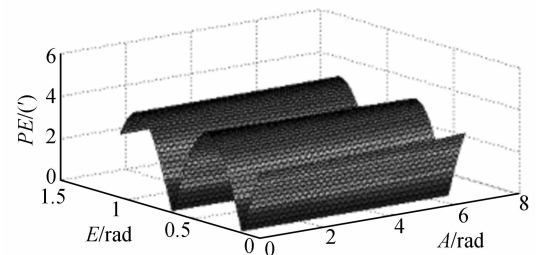
(d) 第 4 组
(d)The fourth group

图 2 PA 计算结果示意图

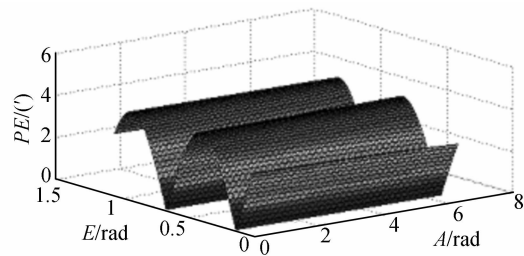
Fig. 2 Schematic of PA's calculations



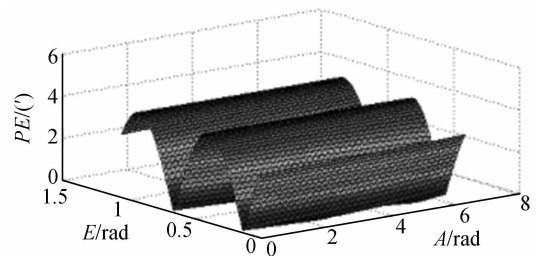
(a) 第 1 组
(a)The first group



(b) 第 2 组
(b)The second group



(c) 第 3 组
(c)The third group



(d) 第 4 组
(d)The fourth group

图 3 PE 计算结果示意图

Fig. 3 Schematic of PE's calculations

分析计算结果,可以看出随着姿态的变化,PA及PE的数值在细节上(如极值点)有所变化,但大体趋势是一致的。在系泊标定及任务时,航向不会发生大的变化(任务时可能会变换航次,但每航次内基本不会发生大的变化),纵倾角及横倾角可取在该任务海况下的理论最大值,即可以根据任务设置情况,将一组姿态常量带入式(11)及式(12)。根据计算结果,在标定方位或俯仰零点时,尽量选择相应的极小值点附近进行标定测量。在任务时,根据指标要求,合理布置船位,将测量工作角度限制在理论指标范围内(尽量避免极大值点附近),从而保证设备的测角精度。

3 站位修正

如图1所示, GPS差分测量天线点 G_A 并不设置在视轴中心点 T 处,而为了保证测角精度,需要知道 T 点精确的大地坐标值^[9],这就需要利用差分GPS测得的 G_A 坐标计算出 T 点的大地坐标值。通过分析,这是一个船载坐标系到大地坐标系的转化过程。文中建立了船载站位坐标系,以 G_A 为坐标原点, y 轴指向天空为正, x 轴指向船艏为正, z 轴由左手定则确定,船载站位坐标系如图4所示,其中 T 点的坐标为 $(-7.5, 3.3, 4.9)$,单位为 m 。

$$\begin{bmatrix} RX_i \\ RY_i \\ RZ_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin GL_i & \cos GL_i & 0 \\ \cos GL_i & \sin GL_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\sin GB_i & \cos GB_i & 0 \\ \cos GB_i & \sin GB_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} GX_i \\ GY_i \\ GZ_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{zi} \\ y_{zi} \\ z_{ci} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

(3)最后由 (RX_i, RY_i, RZ_i) 计算得到 (RB_i, RL_i, RH_i) (即解算 (GB_i, GL_i, GH_i) 到 (GX_i, GY_i, GZ_i) 的逆方程组^[9])。

实验时,在测量船上的不同位置放置2台差分GPS设备,其中一点当作 G_A ,另一点作为 T 点,利

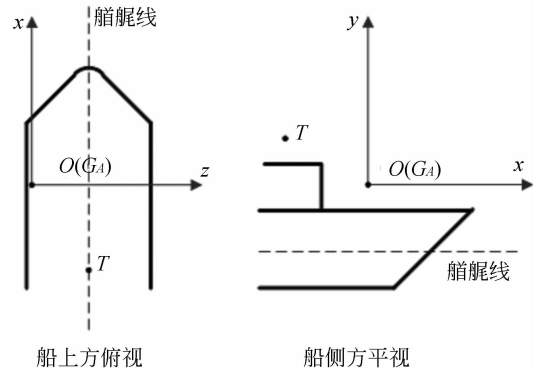


图4 船载站位坐标系示意图

Fig. 4 Schematic of coordinate system for ship-board station

用 T 点在船载站位坐标系下的坐标为 (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) ,该值可在布站后实际测量得到,误差可近似为0。则站位姿态修正算法描述如下:

(1)根据姿态利用式(13)将 T 点转化为测站大地坐标系下的坐标 (x_{zi}, y_{zi}, z_{zi}) ;

$$\begin{bmatrix} x_{zi} \\ y_{zi} \\ z_{zi} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{RT} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

(2)根据 O 点GPS差分测量数据 (GB_i, GL_i, GH_i) 计算地心坐标 (GX_i, GY_i, GZ_i) ^[9],再由 (x_{zi}, y_{zi}, z_{zi}) 利用式(14)计算得到视轴中心点 T 在地心坐标系下坐标 (RX_i, RY_i, RZ_i) ;

用上述站位转换方法,通过 G_A 点测量坐标计算出 T 点坐标 (RX_i, RY_i, RZ_i) ,并与差分测量结果 (rX_i, rY_i, rZ_i) 按时间进行比对,表4为从中选择不同位置的4组值。

表4 站位修正比较值

Tab. 4 Comparison values of station correction

(m)

RX_i	RY_i	RZ_i	rX_i	rY_i	rZ_i
-2 515 255.31	4 261 858.93	3 758 316.91	-2 515 255.39	4 261 859.00	3 758 316.89
-2 515 341.79	4 261 817.87	3 757 928.84	-2 515 341.90	4 261 817.92	3 757 928.83
-2 513 748.33	4 261 826.01	3 757 624.02	-2 513 748.35	4 261 825.93	3 757 624.07
-2 514 184.56	4 261 866.40	3 756 316.01	-2 514 184.60	4 261 866.49	3 756 316.05

通过比较,两者距离最大为 0.12 m,即站位误差 $\sigma=0.12$ m,这一误差是由 GPS 差分误差(本设备的理论差分精度为 5 cm)造成的。对于目标距离 $R \geq 15$ km,由表达定位误差对测角精度影响的近似计算公式(15)得到船载经纬仪对测角精度最大综合影响 $Rae=1.6''$,这对于船载光测设备来说可近似为 0。

$$Rae = \arctan(\sigma/R) \times 3\ 600. \quad (15)$$

4 事后数据处理

船载经纬仪的测角精度测量方案如下^[10-13]:

(1)将设备参数代入误差模型,计算出能够保证精度 A 、 E 的测量范围;

(2)在此范围内拍摄陆上方位标及空中的动态靶标,并记录编码器数据 (A_i, E_i) ,通过事后判读提取脱靶量 $(\Delta A_i, \Delta E_i)$,此过程中包括正割补偿及测角量静态误差修正^[9];

(3)对姿态数据进行延时修正后,通过船摇反修正得到实际测角数据 (CA_i, CE_i) ,计算过程如式(1)~式(3)所示;

(4)将靶标的测量值 (TB_i, TL_i, TH_i) (其中方位标通过事前标定测量得到,动态靶标通过其上装载的 GPS 差分定位给出位置信息)代入到转换后站位信息 (RX_i, RY_i, RZ_i) ,计算出理论测角值 (TA_i, TE_i) ^[10];

(5)比较 N 组理论与实测值,由式(16)计算精度 (σ_A, σ_E) ;

$$\begin{cases} \sigma_A = \sqrt{\sum_{i=1}^N (TA_i - CA_i)^2 / N} \\ \sigma_E = \sqrt{\sum_{i=1}^N (TE_i - CE_i)^2 / N} \end{cases}. \quad (16)$$

(6)根据数据使用要求对数据进行平滑滤波,可选择使用最小二乘算法或卡尔曼算法^[10]。

5 实验结果

自购船载光测设备都有局部基准,本文的前期试验利用某高精度摇摆试验台对这些设备进行检测和标定,所用摇摆试验台的航向角 H 经测定为已知(计算时代入常数),横滚及俯仰幅度最大为 10° 。图 5 为对海上靶船的测量结果(未滤波),摇

摆台纵倾及横倾做幅度为 3° 的正弦摆动(模拟 4 级海况)。

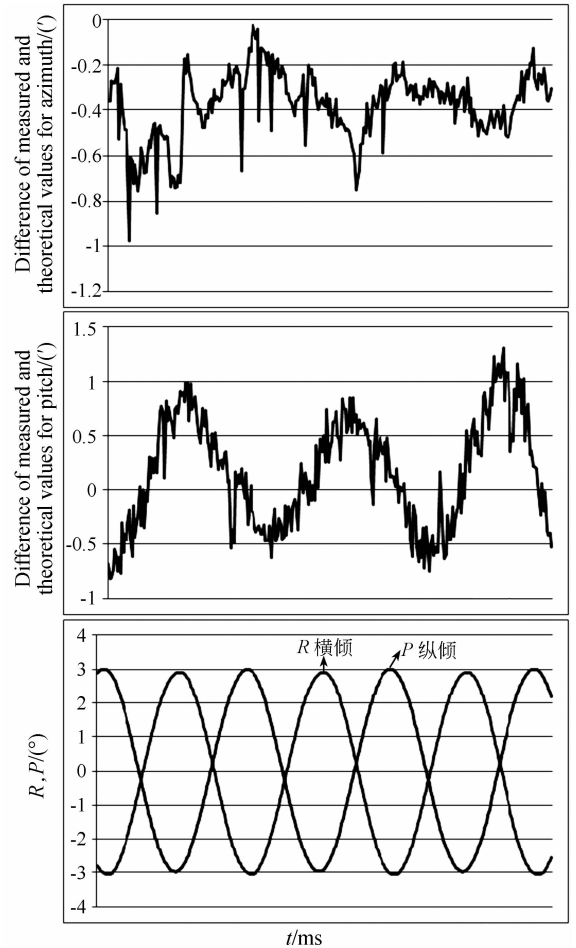


图 5 摇摆台数据处理结果

Fig. 5 Results of data processing on swing table

光测设备上船后,进行了多航次靶船试验,通过误差模型分析设计测量船航线。根据任务和布站限制,由误差模型计算出该试验任务使用船载精确姿态测量系统测量姿态数据时的最优精度测量范围为:方位角为 $355^\circ \sim 25^\circ$ 和 $175^\circ \sim 205^\circ$ (分别对应船体的两侧),俯仰角为 $35^\circ \sim 15^\circ$,在此工作范围内理论最优误差(该范围内误差均方根值)如下:方位角为 $50.3''$,俯仰角为 $32.9''$ 。任务中测量系统对距离其约 20 km 处的移动靶船进行跟踪并拍摄,图 6 即为某一航次的事后处理结果(试验当天海况约为二级,数据未滤波),处理时使用的是局部基准输出的姿态测量数据。

图 7 为采用船载精确姿态测量系统输出的姿态数据进行计算得到的结果(与图 6 采用同一时间段的测量数据,结果未滤波)。

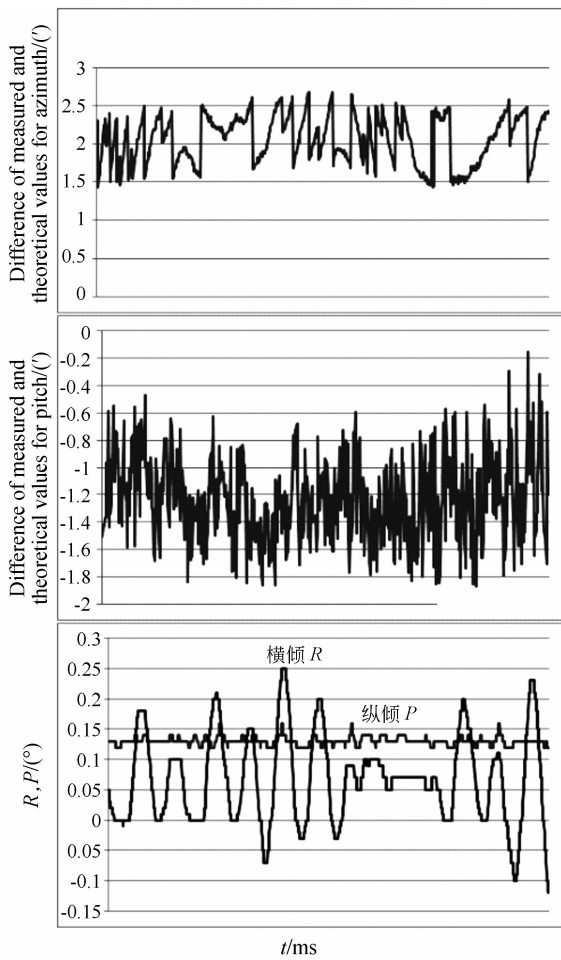


图 6 测量移动靶船(用局部基准)处理结果

Fig. 6 Results of processing data for measurement moving target ship (by using local reference)

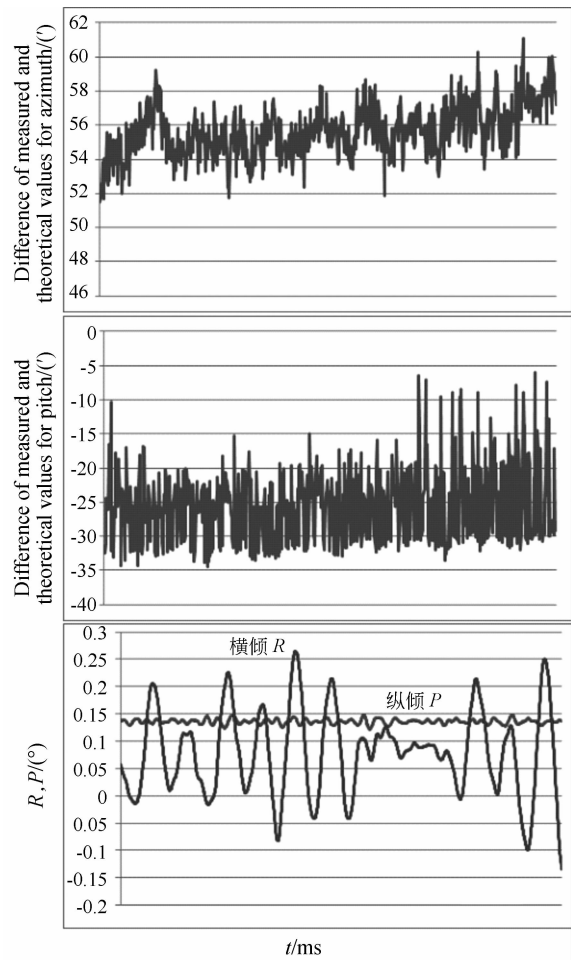


图 7 测量移动靶船(用精确姿态)处理结果

Fig. 7 Results of processing data for measurement moving target ship (by using accurate attitude measurement system)

设备上船后,共进行了 3 种类型多组试验,包括系泊状态下对已知固定方位标的拍摄处理,航行状态下对固定方位标的拍摄处理,以及航行状态下对移动靶船的跟踪、拍摄及处理。表 5 为各个状态下测角精度的计算结果,其中前 3 组为使用局部基准输出的姿态数据,最后一组为使用船载精确姿态测量系统获得的姿态数据进行处理。

表 5 测角精度计算结果

Tab. 5 Calculation results of angular accuracy

	σ_A	σ_E
系泊对静态目标	$\leq 1.03'$	$\leq 0.76'$
航行对静态目标	$\leq 1.27'$	$\leq 1.04'$
航行对动态目标	$\leq 2.68'$	$\leq 1.42'$
航行对动态目标(姿态)	$\leq 57''$	$\leq 34''6$

6 结 论

分析实验数据可知,在高精度摇摆台上,由于没有振动的影响,使得姿态测量数据分辨力低以及输出数据延时造成的影响相对较小,所以结果相对比较平滑,而船载设备工作时振动较大,上述影响被放大,造成数据波动较大,这就需要采用数据分辨力更强,实时性更好,测姿精度更高的设备或手段加以解决,比如采用动机座天文定姿及定位方案,以拍星图像处理的方式测量姿态。实验中还发现,姿态及差分 GPS 设备受环境影响较大,在不同海况下的数据精度不同(所以实验结果也受海况影响),天气好坏也影响了这些设备从启动到稳定工作(此时输出符合指标的数据)所需的时间,在今后

开发车载设备时要加以注意。

综合多组实验数据,结果表明,通过误差模型选择测角范围,完成修正站位数据以及事后数据处理后,在车载精确姿态测量系统最大误差航向角为 $1.2'$,纵倾角为 $24''$,横倾角为 $24''$ 的测量条件下,船

载经纬仪对动态目标的测角精度,即误差均方根为:方位角小于等于 $57''$,俯仰角小于等于 $34''$,实验结果表明该车载经纬仪基本达到了该条件下的理论最优精度,也基本满足了车载外弹道测量的工程要求。

参考文献:

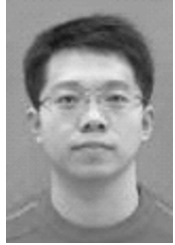
- [1] 姜永刚,金洵,毛亮. 航天测量船经纬仪系统误差动态修正方法[J]. 价值工程,2012,16:299-300.
JIANG Y G, JIN X, MAO L. System errors modification method for photoelectrical theodolite under the dynamic condition in TT&C-ship [J]. *Value Engineering*, 2012,16:299-300. (in Chinese)
- [2] 毛亮,徐正峰,卢鲁. 经纬仪测星法在测量船上的工程化应用研究[J]. 现代电子技术,2012,35(12):157-159.
MAO L, XU ZH F, LU L. Application of measuring star method with theodolite on TT&C ship [J]. *Modern Electronics Technique*, 2012,35(12):157-159. (in Chinese)
- [3] 李增,吴志勇,佟钢,等. 车载经纬仪静态指向误差补偿[J]. 光学精密工程,2010,18(4):921-927.
LI Z, WU ZH Y, TONG G, *et al.*. Pointing error correction for vehicular platform theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(4):921-927. (in Chinese)
- [4] 周健,毛刚,赵李健,等. BD2/GPS 四频高精度接收机在远望号船姿测量中的应用[J]. 测绘科学技术学报,2012,29(3):171-174.
ZHOU J, MAO G, ZHAO L J, *et al.*. Attitude measurement with high-precision dual-system quad-frequency BD2/GPS receiver in yuanwang surveying ship [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012,29(3):171-174. (in Chinese)
- [5] 李焱. 舰载光电全息显控系统[J]. 液晶与显示,2012,6(3):378-384.
LI Y. Full information display and control system for shipborne optical-electronic[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,6(3):378-384. (in Chinese)
- [6] 佟钢,王芳. 车载平台变形对测角误差的影响分析与修正[J]. 光学精密工程,2011,19(4):775-782.
TONG G, WANG F. Analysis and correction for influence of vehicle platform deformation on measuring errors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(4):775-782. (in Chinese)
- [7] 王辉华,刘文化,张世英,等. 舰载光电跟踪系统跟踪误差源分析[J]. 电光与控制,2007,14(2):100-103.
WANG H H, LIU W H, ZHANG SH Y, *et al.*. Analysis of tracking error source for shipboard photoelectric tracking system [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000,42(2):28-38. (in Chinese)
- [8] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1524-1530.
XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(7):1524-1530. (in Chinese)
- [9] 康德勇,李晓勇,王旭良,等. 船位误差对外弹道测量及定轨精度的影响[J]. 电讯技术,2010,50(9):106-109.
KANG D Y, LI X Y, WANG X L, *et al.*. Influence of ship's position error on exterior trajectory measurement and orbit determination [J]. *Telecommunication Engineering*, 2010,50(9):106-109. (in Chinese)
- [10] GAWRONSKI W,BAHER F,QUINTERO O. Analysis of tracking error source for shipboard photoelectric tracking system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007,14(2):100-103.
- [11] 高策,乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程,2007,15(6):846-851.
GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):846-851. (in Chinese)
- [12] 马志强,郭福生,陈良友,等. 靶场大地测量[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
MA ZH Q, GUO F SH, CHEN L Y, *et al.*. *Optical Measurement of Shooting Range* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.

jing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)

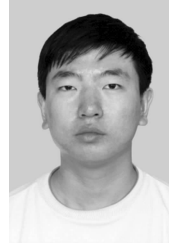
- [13] 薛国虎, 李晓勇, 张忠华, 等. 测量船多设备外测数据的融合算法[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(1): 52-55.

XUE G H, LI X Y, ZHANG ZH H, *et al.*. Fusion algorithm for multi-source tracking data of space instrumentation ship [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology.*, 2011, 30(1): 52-55. (in Chinese)

作者简介:



盛磊(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电测控设备软件开发及数据处理的研究。E-mail: sljlu@163.com



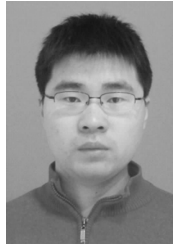
张世学(1980—),男,吉林长春人,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2009年于澳门大学获得博士学位,主要从事计算机科学图形学和数字图像处理等方面研究工作。E-mail: zhangsx@ciomp.ac.cn



刘旨春(1974—),男,吉林伊通人,博士,副研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学图像的计算机处理技术的研究。E-mail: liu357cn@yahoo.com.cn



吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,博士,博士生导师,研究员,主要从事光电测控设备总体技术和光纤通讯技术方面的研究。E-mail: wzy0607@yahoo.com.cn



高策(1981—),男,吉林公主岭人,助理研究员,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学工程、计算机应用等方面的研究。E-mail: gaoc2006@yahoo.com.cn



王世刚(1962—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,2001年于吉林大学获得博士学位,主要从事多媒体通信、视频压缩及视频通信方面的研究。E-mail: wangshigang@vip.sina.com

导师简介:

(版权所有 未经许可 不得转载)