

· 测试、试验与仿真 ·

舰载经纬仪船摇误差修正方法研究

韩先平

(92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要:针对海上舰船摇摆引起的舰载经纬仪巨大定位及测量误差问题,提出一种船摇误差修正的高精度解决方案。利用惯性导航系统测量出的船体摆动姿态角和GPS局部基准定位信息,对舰载经纬仪实时站址数据和测角数据做了船摇修正处理,并研究了站址误差对测角精度的影响。通过对修正前后数据做误差比对分析,提高了海基测控装备外弹道的测量精度。试验证明,该方法简单、实用,修正后精度满足使用要求,可以推广应用。

关键词:舰载经纬仪;船摇误差修正;姿态角;局部基准;坐标转换

中图分类号: TH744

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0063-05

Research on Vessel-shake Error Correction of Shipborne Theodolite

HAN Xian-ping

(92941 Army Unit, Huludao 125001, China)

Abstract: Aiming at the great error of positioning and measurement of a shipborne theodolite caused by vessel shaking, a high precision solution for correcting the vessel-shake error is proposed. Vessel-shake attitude angle and GPS local baseline positioning information are measured by an inertial navigation system. The shipborne theodolite data of real-time position and measuring angle are performed to vessel-shake error correction. And the influence on measuring angle accuracy from position error is researched. According to the data error comparison analysis before and after correction, the exterior trajectory measuring accuracy of sea-based measurement and control equipments is improved. Experimental results show that the method is simple and applicable. The corrected accuracy can meet the requirements, and can be applied widely.

Key words: shipborne theodolite; vessel-shake error correction; attitude angle; local baseline; coordinate conversion

随着海上职能的拓展和测量任务的需要,传统陆基装备逐渐朝海基发展已成为必然趋势^[1]。光电经纬仪在舰船上工作时,载舰在海浪的作用下使舰船不停摇摆,船体产生纵摇、横摇和艏摇,这使经纬仪的实际站址坐标和光电传感器视轴的空间指向上均发生相应变化,造成巨大测量误差,甚至导致目标跟踪丢失^[2]。

目前,国内外解决此类问题的方式主要有两种^[3],一种是采用反方向摇摆的机械稳定平台,为光电跟踪测量设备提供近似水平的安装基础,如我国

远望号测量船上的718光电经纬仪的稳定平台^[4],但此种方式缺点是结构复杂、成本太高,不易普及用于小型舰艇上;另一种就是直接把光电经纬仪安装在甲板上,通过实时修正船摇数据保证经纬仪视轴的稳定指向。这种方法虽取消了笨重的机械稳定平台和中间测控环节,降低了成本,但对船摇姿态角的修正补偿精度提出了很高要求^[5]。根据陆上固定设备的精度测量方法建立一套类似的舰载方案,首先通过惯性导航系统测量出船体摆动的姿态角,同时安装GPS局部基准对船体定位,再用文中方法对经纬

仪实时站址信息和经纬仪俯仰轴和方位轴进行船摇姿态角的实时补偿,最后利用现有测量条件对船摇修正数据做误差分析,从而进一步提高海基外弹道测量精度。

1 实时站址数据修正

光电经纬仪在舰船上的安装布局如图1所示。其中, O 点为船体中心,一般测量船都装有一套定位及定姿系统,即惯性导航系统^[6],把 O 点看作是其测量定位点。以 O 点为原心,建立船体运动坐标系 $X_c Y_c Z_c$,围绕其坐标轴有横摇,纵摇以及艏摇三个姿态角; T 点为经纬仪实际安装位置,后面桅杆上的 GA/GB 为GPS局部基准^[7]的前/后天线,其连线与船体 X_c 轴平行,能完成对经纬仪的测姿与定位,它的测量定位点为 GA (前天线)。

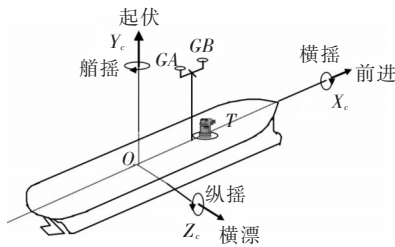


图1 经纬仪在舰船上的安装位置

由于GPS测量点(P)与经纬仪实际站址(T)的位置不同,导致船摇对定位信息产生一定影响,如图2所示。以纵摇为例,设当前时刻纵摇角为 θ_1 ,测量点由 P_{11} 到 P_{12} ,实际站址由 T_{11} 到 T_{12} ,若纵摇角为 θ_2 ,测量点由 P_{11} 到 P_{22} ,实际站址由 T_{11} 到 T_{22} ,显然,在大地直角坐标系下, P 点的变化比 T 点的要大,如不对船摇姿态角进行有效修正,而仅以相对位置 T_{11} 作为站址做定点引导,由于站址误差,将造成脱靶量抖动,影响测角精度^[8]。

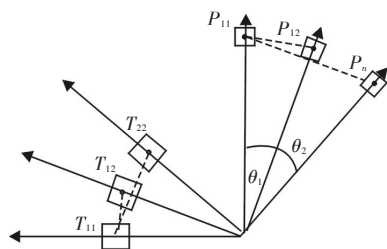


图2 船摇对经纬仪定位的影响

由图1简化得到图3所示的经纬仪定位坐标。

在大地直角坐标系 XYZ 内,建立以GPS测量点为原点 O 的甲板坐标系,其沿三个坐标轴的旋转角度即代表船摇。这里,GPS局部基准给出实时 O 点经纬度(GB_i, GL_i, GH_i),以及甲板坐标系下的旋转角度,其中横倾角为 R_i 、航向角为 H_i 、纵倾角为 P_i ,通过实际测量得到实际站址 T 点相对于 O 点的位置,即 T 点在甲板坐标系下坐标(BX, BY, BZ)已知(恒定值),修正算法首先要求出 T 点的大地直角坐标(RX_i, RY_i, RZ_i),甲板系坐标与大地系坐标转换关系如图4所示。

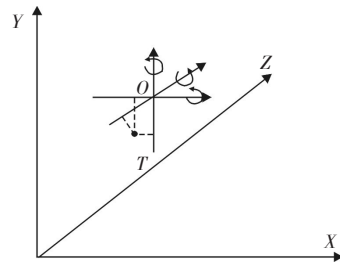


图3 舰载经纬仪定位坐标

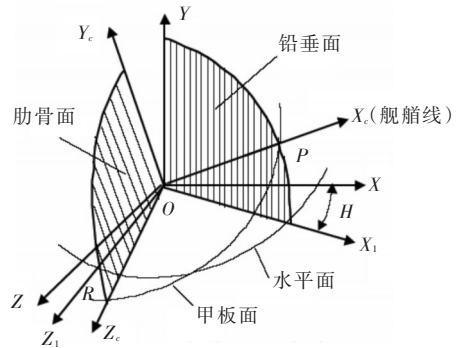


图4 甲板坐标系与大地坐标系转换关系

1.1 甲板坐标系转测量坐标系

首先将(BX, BY, BZ)作船摇反修正,即做反旋转变换,得到测量系(等同于陆地上的测站坐标系)下坐标(CX_i, BY_i, BZ_i),设横倾角为 R_i 、航向角为 H_i 、纵倾角为 P_i ,公式如下

$$\begin{bmatrix} CX_i \\ CY_i \\ CZ_i \end{bmatrix} = RT \begin{bmatrix} BX \\ BY \\ BZ \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$RT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_i & -\sin R_i \\ 0 & \sin R_i & \cos R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P_i & -\sin P_i & 0 \\ \sin P_i & \cos P_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos H_i & 0 & -\sin H_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin H_i & 0 & \cos H_i \end{bmatrix}$$

其中, RT 是船摇反修矩阵。

1.2 测量坐标系转大地直角坐标系

经过上一步变换,问题变成已知测量系站址,以及测量系下目标的坐标,求目标的大地直角坐标(RX_i,RY_i,RZ_i),由(GB_i,GL_i,GH_i)计算得到 O 点大地直角坐标(GX_i,GY_i,GZ_i),则计算 T 点的大地直角坐标,公式如下

$$\begin{bmatrix} RX_i \\ RY_i \\ RZ_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GX_i \\ GY_i \\ GZ_i \end{bmatrix} + CT \begin{bmatrix} CX_i \\ CY_i \\ CZ_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$CT = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - GL_i) & 0 & -\sin(90^\circ - GL_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90^\circ - GL_i) & 0 & \cos(90^\circ - GL_i) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos GB_i & \sin GB_i \\ 0 & -\sin GB_i & \cos GB_i \end{bmatrix}$$

其中, CT 为坐标转换矩阵。

1.3 定位误差对测角精度影响

通过对误差影响的分析,从式(2)可以看出,加号右边的误差影响可计为0,仅有左边(GB_i,GL_i,GH_i)的误差,即GPS定位数据的测量误差对修正定位数据产生影响。综合以上的计算公式,可得 T 点和 O 点的大地直角坐标差($\Delta X_i,\Delta Y_i,\Delta Z_i$)为

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = (CT \times RT) \begin{bmatrix} BX \\ BY \\ BZ \end{bmatrix} \quad (3)$$

那么,定位误差对测角精度影响可近似表达为

$$Rae = \arctan(\sigma/R) \times 3\ 600 \quad (4)$$

其中, σ 为定位偏差; R 为目标距离;影响 Rae 的单位是"。通常情况,最大偏差为2 m时,则对 $R = 20$ km处的靶标,测角精度的综合影响约206"。

2 测角数据的船摇修正

跟踪陆上静态方位标以及空中的动态靶标,记录编码器数据(A',E') (经过正割补偿),通过事后判读提取脱靶量($\Delta a_i,\Delta e_i$),对测量数据进行基本误差修正^[9],得到 A'_i 和 E'_i ,公式如下

$$\begin{cases} A'_i = A'_i + \Delta a_i - g - C \sec E'_i - b \tan E'_i + I \sin(A_H - A'_i) \tan E' \\ E'_i = E'_i + \Delta e_i - h - I \cos(A_H - A'_i) \end{cases} \quad (5)$$

进行船摇反修正得到实际测角数据(CA_i,CE_i),

计算过程如下

$$\begin{bmatrix} Xc_i \\ Yc_i \\ Zc_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E'_i \cos A'_i \\ \sin E'_i \\ \cos E'_i \sin A'_i \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = RT \begin{bmatrix} Xc_i \\ Yc_i \\ Zc_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

将靶标的测量值(TB_i,TL_i,TH_i) (其中方位标由事前标定测量得到,动态靶标由其上装载的GPS定位器给出实时位置信息)代入站址信息(RX_i,RY_i,RZ_i),计算出理论测角值(TA_i,TE_i),转换公式见文献[10]。然后比较 N 组理论与实测值,计算精度($\theta A,\theta E$) (θE 计算与下式类似)。

$$\theta A = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (TA_i - CA_i)^2}{N} \right)^{1/2} \times 3\ 600 \text{ (角秒)} \quad (7)$$

3 试验验证

以某次靶机飞行试验任务为例,对舰载经纬仪实时定位数据及测角数据用本方案做船摇误差修正。靶机上装有GPS测量系统,采用载波相位差分进行高精度解算^[11],GPS数据转换到测控站点的测角精度可达到0.01 mrad。靶机上GPS定位采用的是WGS-84坐标系,计算GPS定位结果并转换到修正后的舰载经纬仪实时定位数据,其方位角 A 和俯仰角 E 做为理论真值,然后根据式(7)分析经船摇修正前后对测角精度的影响。本试验数据选取靶机距舰载经纬仪测量点10~20 km飞行段,靶机由近至远较平稳飞行;舰船在4级海况,摇摆周期为6~10 s,摆幅小于4°;经纬仪采样频率为40帧/s,约记录4万个数据。由于篇幅所限,文中仅给出经纬仪实测角度值与真值比较结果,如图5、图6所示。经船摇误差修正后角度与真值比较结果,如图7、图8所示。

由图5、图6及表1的统计数据可以看出,舰载经纬仪在海面作业由于船摇的影响跟踪测量目标非常不稳定,随着目标与测量点距离的增大,在240~260 s甚至出现了跟踪失锁^[12]。通过文中船摇误差修正方案对测角数据进行误差修正后可以有效地控制测角误差的范围,见图7、图8。由表2统计结果可以看出,修正后角度数据标准差均小于4",可以实现舰载经纬仪的稳定跟踪。对实测丢失段数据方案中给予了及时的拟合补偿,其测角平均误差仍控制在

20"以内(由于未进行大气折射修正,俯仰角误差偏大),修正后精度符合舰载经纬仪的使用要求。

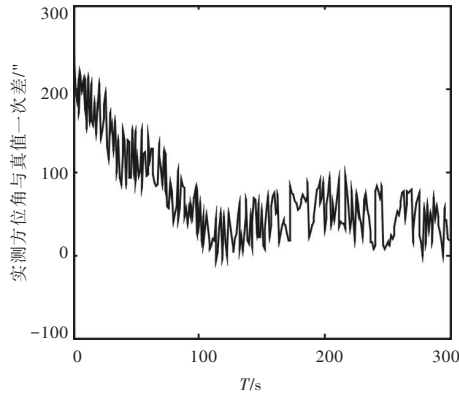


图5 实测方位角与真值一次差曲线图

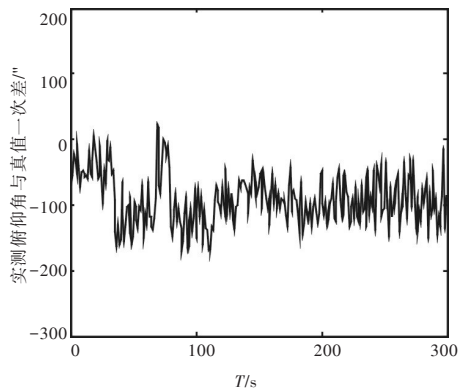


图6 实测俯仰角与真值一次差曲线图

表1 舰载经纬仪实测角度误差统计结果

	均值/''	标准差/''	最大值/''	最小值/''
实测方位角误差	68.523	38.485	240.660	-7.660
实测俯仰角误差	-91.328	30.804	-170.350	-22.080

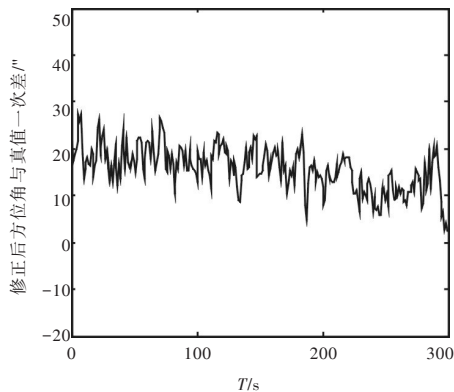


图7 修正后方位角与真值一次差曲线图

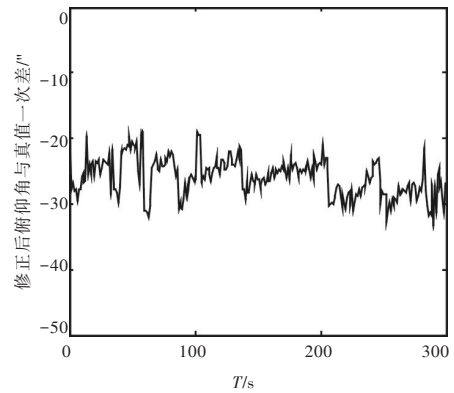


图8 修正后俯仰角与真值一次差曲线图

表2 舰载经纬仪测角误差船摇修正精度统计结果

	均值/''	标准差/''	最大值/''	最小值/''
修正后方位角误差	15.829	4.581	27.377	2.238
修正后俯仰角误差	-25.893	2.873	-33.396	-18.932

4 结束语

目前舰载经纬仪跟踪测量系统已成为测控体系中不可缺少的重要组成部分。根据经纬仪在舰船上实际安装使用情况,利用GPS局部基准通过坐标转换及船摇姿态角修正对测量站址实现实时准确定位,并研究了站址误差对测角精度的影响。在此基础上,再利用船姿测量信息对实时测角数据进行修正,从而极大地提高了船摇修正的精度。经试验验证,文中提出的修正方案算法简单、抗干扰强、修正精度高,可以实现舰载经纬仪的稳定跟踪测量,并使其作为测量设备应用于靶场。

参考文献

- [1] 孙隆和,卢广山.机载光电探测、跟踪、瞄准系统技术分析和发展研究[J].电光与控制,1995,2(2):1-10.
- [2] David J H, James D. Modern control methods applied to a line-of-sight stabilization and tracking system[C]. Proceedings of the American Control Conference,1987:1491-1498.
- [3] 李哲,苏秀琴,乔永明,等.基于船姿测量的舰载光电经纬仪视轴稳定方法研究[J].光子学报,2009,38(6):1552-1556.
- [4] 蒋冰.船用稳定跟踪平台控制技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009:8-11.

- [5] Iecovich Meir. Line of sight stabilization requirements for target tracking system [J]. SPIE, 1990, 1304:100-111.
- [6] 郑荣才.全舰统一姿态基准测量技术研究[D].天津:天津大学机械工程学院,2007.
- [7] 马颀. GPS船舶姿态测量技术研究[D].大连:大连海事大学,2004:10-13.
- [8] 李晓勇,张忠华,张同双,等. 航天测量船船摇数据特性分析[J]. 中国惯性技术学报,2006,14(3):27-30.
- [9] 刘利生. 外测数据事后处理[M]. 北京:国防工业出版社,1999:15-19.
- [10] 朱华统. 常用大地坐标系及其变换[M]. 北京:解放军出版社,1990:14-18.
- [11] Breivik K, Forsell B. Estimation of multipath error in GPS pseudorange measurements[J]. Navigation, 1997, 44 (1): 43-52.
- [12] YANG Wen-shu, MA Jia-guang. A new tracking and measuring control system for optical electronic theodolite[J]. SPIE,2002(4714):118-123.

(上接第13页)

辐射特性;(5)光电靶通过捷径后退出,一个航次结束。

4.3 数据处理要求

(1)空海GPS按10 Hz记录测量数据。

(2)记录探测数据和融合后的目标航迹数据。

(3)事后根据目标的GPS测量数据和站点坐标参数,计算相对于红外探测设备传感器和相对于参考点的目标数据。

(4)对比目标GPS数据和红外探测设备测量数据,统计分析红外探测设备数据精度。

(5)以100 m距离间隔,统计红外探测设备各取样区间探测概率,根据GPS测量的目标距离和探测概率统计数据确定作用距离和探测概率^[10]。

(6)记录测试期间实时的气象数据。

5 结论

针对双波段红外探测设备不同波段的探测要求,利用无人机加载曳光管作为光电靶,根据其双波段辐射特性,结合航路设计,实现同一靶标满足的双波段探测的测试要求,减少靶标研制经费和测试消耗;通过对航路距离和航向的统筹设计,同一个测试航次满足作用距离和目标数据精度多个项目的测试要求,实现了多项目共用靶标和测试航

路,优化测试资源,提高测试效率,节省测试成本,降低测试风险。文中对目标航迹真值精度进行了深入分析,总结在不同条件下,航路、航向及布站等相关参数设置方法,为该测试项目组织实施提供充分的技术准备和选择空间。

参考文献

- [1] 王永仲.现代军用光学技术[M].北京:科学出版社.
- [2] 王文斌.海军装备试验靶标技术[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 鲁培耿,隋景辉.海军装备试验常用词典[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [4] 鲁培耿,张连仲.靶场标准化研究与实践[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [5] 张建新.导弹紫外辐射特性模拟方法研究[J].光电技术应用,2014,29(2):90-94.
- [6] 陈福胜.海军光电系统手册[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [7] 王宇,牟达,李静芳,等.长焦距航空相机光学系统设计[J].光电技术应用,2014,29(6):1-6.
- [8] 梅隧生.光电子技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [9] 刘京郊.光电对抗技术与系统[M].北京:中国科学技术出版社.
- [10] 于晓峰.装备试验数据处理[M].北京:国防工业出版社,2010.