doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.012

# 基于 MLE 算法的海上角度交会测量方法及其精度分析\*

张同双1,2,\*\*,傅敏辉1,钟德安1,郭敬明3,王二建1

(1.中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431;2.飞行器海上测量与控制联合实验室,江苏 江阴 214431;3.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要:针对我国现有测量船单站 REA 测量体制精度相对较低的问题,提出了基于光电经纬仪的海 上角度交会测量方法。介绍了角度交会测量原理和设备布站原则,构建了 AE-AE 异面交会测量系 统,设计了基于 MLE(Maximum Likelihood Estimation)算法的海上角度交会测量算法和船摇修正方法, 仿真分析了船体姿态测量误差、设备测角误差以及站址定位误差等的影响。仿真结果表明,站址测 量误差是海上角度交会测量的最主要误差源,船体姿态测量误差和设备测角误差对海上角度交会测 量精度有一定的影响,当船体水平姿态测量误差优于 20″、航向测量误差优于 30″、设备测角误差优于 20″、站址测量误差优于1 m时,海上角度交会测量精度可达1 m。该法解决了动态条件下的飞行目标 高精度测量技术难题,为后续工程设计奠定了基础。

关键词:航天测量船;REA测量体制;光电经纬仪;交会测量;异面交会;交会角 中图分类号:TN209;V556 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2013)08-1033-06

# Marine Angle Intersection Method Based on MLE Algorithm and its Precision Analysis

ZHANG Tong-shuang<sup>1,2</sup>, FU Min-hui<sup>1</sup>, ZHONG De-an<sup>1</sup>, GUO Jing-ming<sup>3</sup>, WANG Er-jian<sup>1</sup>

(1. China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin 214431, China;

2. Joint Laboratory of Ocean-based Flight Vehicle Measurement and Control, Jiangyin 214431, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to solve the problem that China's space tracking ship's REA measurement system has relatively low precision due to single station, a marine angle intersection measurement method based on photoelectric theodolite is proposed. Firstly, the basic principle of angle intersection and equipment arranging requirement are introduced. Secondly, an AE-AE non-coplane intersection measurement system is constructed. Thirdly, the marine angle intersection algorithm based on maximum likelihood estimation (MLE) method and ship attitude correction method are designed. Finally, the simulation is carried out. Simulation results indicate that the site positioning error is the main error source of marine angle intersection, and the ship attitude measurement error and the angle measurement error of theodolite also have a certain impact on the marine angle intersection. When the ship horizontal attitude measurement error is less than 20", the course measurement error is less than 30", the angel measurement error of theodolite is less than 20", and the site positioning measurement error is less than 1 m, the accuracy of marine angle intersection can reach 1 m. This method can solve the problem of the high precision target measurement in dynamic conditions, and lay the foundation for the further engineering application.

Key words: space tracking ship; REA measurement system; photoelectric theodolite; intersection; non-coplane angle intersection; intersection angle

### 1 引 言

我国航天测控系统一般采用单站 REA 定位测

量体制,主要测量元素为目标斜距 R、俯仰角 E、方 位角 A 以及 REA 经微分平滑得到的相应速度参数

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-05-08;修回日期:2013-06-24 Received date:2013-05-08; Revised date:2013-06-24

<sup>\*\*</sup> 通讯作者:zts\_123@163.com Corresponding author:zts\_123@163.com

等。单站 REA 测量体制具有设备简单、成本低、单 站即可实现目标定位等优点[1],在历次航天测控试 验中发挥了重大作用。随着航天测控技术的不断发 展,对目标外测精度、主要特征点及落点测量精度等 的要求不断提高,现有测量体制已不能完全满足后 续航天试验需求。基于光电经纬仪的角度交会测量 体制具有测量精度高、可获得目标实时景象信息、可 事后复现、不受"黑障区"和地面杂波影响等优点,在 陆基靶场测量中得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。充分利用光 电经纬仪与角度交会测量体制的优点,实现目标轨 迹、落点的高精度测量和实时景象测量,对航天试验 效果评估具有重要的意义。测量船海上测控是在动 态条件下进行的,设备的位置和姿态在不停地变化, 采用角度交会测量体制时,需解决高精度的船体姿 态和站址位置测量<sup>[5]</sup>难题。本文在介绍角度交会测 量原理的基础上,提出并设计了海上角度交会测量 方法,仿真分析了船姿测量误差、设备角度差及站址 测量误差对角度交会测量精度的影响,最后给出了 海上角度交会测量的基本要求。

# 2 角度交会测量原理

## 2.1 角度交会基本原理

角度交会的测量元素是测量设备相对目标的方 位角和俯仰角,角度交会测量原理如图1所示。



图 1 交会测量示意图 Fig.1 The principle of angle intersection

根据单站 REA 定位测量原理,目标 M 在测站 O<sub>1</sub>和 O<sub>2</sub>中的坐标分别为

$$\begin{cases} x = x_{10} + R_1 \cos E_1 \cos A_1 \\ y = y_{10} + R_1 \sin E_1 \\ z = z_{10} + R_1 \cos E_1 \sin A_1 \end{cases}$$
(1)  
$$\begin{cases} x = x_{20} + R_2 \cos E_2 \cos A_2 \\ y = y_{20} + R_2 \sin E_2 \\ z = z_{20} + R_2 \cos E_2 \sin A_2 \end{cases}$$
(2)

式中,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为目标  $M \cong O_1$ 和  $O_2$ 的斜距; ( $x_{10}, y_{10}, z_{10}$ )和( $x_{10}, y_{10}, z_{10}$ )分别为测站  $O_1$ 和  $O_2$ 在 参考坐标系 O-XYZ 中的坐标; $(A_1, E_1)$ 、 $(A_2, E_2)$ 分 别为同一观测时刻两台角度交会测量设备观测目标 M时的实测方位角和实测俯仰角。综合式(1)和式 (2)可得如下公式:

$$\begin{cases} x_{20} - x_{10} = R_2 \cos E_2 \cos A_2 - R_1 \cos E_1 \cos A_1 \\ y_{20} - y_{10} = R_2 \sin E_2 - R_1 \sin E_1 \\ z_{20} - z_{10} = R_2 \cos E_2 \sin A_2 - R_1 \cos E_1 \sin A_1 \end{cases}$$
(3)

因此,在两台角度交会测量设备站址已知的情况 下,式(3)中只有斜距 *R*<sub>1</sub> 和 *R*<sub>2</sub> 为未知数,任意利用方 程组中的两个方程即可解得斜距 *R*<sub>1</sub> 和 *R*<sub>2</sub>,在此基础 上利用式(1)或(2)即可解算得到目标三维坐标。

## 2.2 AE-AE 异面交会测量算法

根据角度交会测量设备与目标构成的空间射线 及测量基线的位置关系,角度交会测量可分为共面 交会和异面交会两类算法。共面交会算法包括L算 法、M算法及K算法,异面交会算法包括方向余弦 法(Direction-Cosine Estimation)、最短距离法(Minimum Distance Estimation, MDE)及最大似然法(Maximum Likelihood Estimation, MLE)等,这些算法各有优缺点 和适用范围<sup>[4]</sup>。

MLE 算法具有定位科学合理、适用范围大、交 会精度高、设备布站灵活等优点,有效消除了因计算 方法引入的测量误差,解决了飞行航路长、控制机动 发射、目标穿过测量基线和垂直发射弹道测试等技 术难题。MLE 具体算法如式(4)~(7)所示:

 $\begin{cases} x = \rho(x_{10} + R_1 \cos A_1 \cos E_1) + (1 - \rho)(x_{20} + R_2 \cos A_2 \cos E_2) \\ y = \rho(y_{10} + R_1 \sin E_1) + (1 - \rho)(y_{20} + R_2 \sin E_2) \\ z = \rho(z_{10} + R_1 \sin A_1 \cos E_1) + (1 - \rho)(z_{20} + R_2 \sin A_2 \cos E_2) \\ R_1 = (m_1 - m_2 K)/(1 - K^2) \\ R_2 = (m_1 K - m_2)/(1 - K^2) \\ (6) \\ \begin{cases} m_1 = (x_{20} - x_{10})\cos A_1 \cos E_1 + (y_{20} - y_{10})\sin E_1 + (z_{20} - z_{10})\sin A_1 \cos E_1 \end{cases} \end{cases}$ 

 $m_2 = (x_{20} - x_{10})\cos A_2 \cos E_2 + (y_{20} - y_{10})\sin E_2 + (z_{20} - z_{10})\sin A_2 \cos E_2$ 

 $K = \cos A_1 \cos A_2 \cos E_1 \cos E_2 + \sin E_1 \sin E_2 + \sin A_1 \sin A_2 \cos E_1 \cos E_2$ 

(7)

式中, $\rho$  为两测站误差分配系数, $\rho = R_2^2/(\sigma_r R_1^2 + R_2^2)$ ,其中  $\sigma_r = \sigma_{r1}^2/(\sigma_{r2}^2, \sigma_{r1}^2, \sigma_{r2}^2)$ ,其中  $\sigma_r = \sigma_{r1}^2/(\sigma_{r2}^2, \sigma_{r1}^2, \sigma_{r2}^2)$ ]为测站 1 和测站 2 的测量统计方差,其他参数含义同前。

#### 2.3 设备布站要求

角度交会测量时,交会角  $\theta$  在 60°~120°之间精 度较高,其中  $\theta$  = 90°时,交会测量精度最高。所谓 交会角,即两测量设备瞄准同一目标时光轴间的夹 角,记设备  $O_i(i = 1,2)$ 的观测矢量为 $(l_i, m_i, n_i)$ :  $\begin{bmatrix} l_i & m_i & n_i \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \cos E_i \cos A_i & \sin E_i & \cos E_i \sin A_i \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ (8) 则交会角的计算公式如下:

$$\cos\theta = \begin{bmatrix} l_1\\ m_1\\ n_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} l_2\\ m_2\\ n_2 \end{bmatrix} = \frac{l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2} \sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}$$
(9)

式中,"·"表示矢量点积。

# 3 海上角度交会测量方法

### 3.1 基本原理

陆基靶场交会测量时,设备站址可通过大地测 量精确获取,设备角度基准可通过天文标校等手段 精确标定,因此,影响陆基靶场角度交会测量精度的 主要因素为设备测角精度和时间同步精度。

海上角度交会测量是在动基座上进行的,交会测量精度除与上述因素有关外,还与站址测量精度、 船体姿态测量精度有关,需要解决站址位置与船体 姿态的高精度高速测量技术难题。

海上角度交会测量的基本方法为:两(多)台光 电经纬仪安装在两(多)艘小型船舶平台上,船舶平 台根据目标飞行轨迹机动布站,以使目标交会角满 足交会测量精度要求。两(多)艘船舶平台上分别同 时安装一套高精度的卫星导航系统、激光陀螺捷联 惯导(Strap-down Inertial Navigation System, SINS)<sup>[6]</sup>、 时间统一系统以及通信保障系统等设备,其中卫星 导航系统采用单站精密定位技术<sup>[7-8]</sup>(Precise Point Positioning, PPP)实现站址位置的高精度测量,激光 陀螺捷联惯导与卫星导航系统、光电经纬仪等组成 组合导航系统<sup>[9-10]</sup>,实现船体姿态的高精度测量, 时间统一系统实现两(多)站测量设备的高精度时间 同步,通信保障系统用于船载测量设备的远程控制 和交会测量信息的实时传输。

基于两台光电经纬仪的角度交会测量原理如图 2 所示,在时间统一系统的控制下,两台光电经纬仪 同步跟踪测量目标,其测量信息经船摇修正后转换 至惯导地平坐标系,然后根据式(4)~(7)计算目标 的空间位置。



图 2 海上角度交会测量 Fig.2 The diagram of marine angle intersection

#### 3.2 船姿修正

解算目标空间位置前,需要将光电经纬仪的测 角信息转换到惯导地平坐标系,具体公式为

$$\begin{bmatrix} x_{gi} \\ y_{gi} \\ z_{gi} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} R_i \cos A_i \cos E_i \\ R_i \sin E_i \\ R_i \sin A_i \cos E_i \end{bmatrix}$$
(10)

式中,  $K_i \, \langle \, \varphi_i \, \partial \, \theta_i \, \partial \, \eta$ 为测站 *i* 的航向角、纵摇角及 横摇角测量值, *C* 为船体姿态矩阵:

$$C = R_{y}(K_{i})R_{z}(-\psi_{i})R_{x}(-\theta_{i});$$

$$R_{y}(K_{i})R_{z}(-\psi_{i})BR_{x}(-\theta_{i})BEEEE:$$

$$R_{y}(K_{i}) = \begin{bmatrix} \cos K_{i} & 0 & -\sin K_{i} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin K_{i} & 0 & \cos K_{i} \end{bmatrix}$$

$$R_{z}(-\psi_{i}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{x}(-\theta_{i}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{i} & -\sin \theta_{i} \\ 0 & \sin \theta_{i} & \cos \theta_{i} \end{bmatrix}$$

由此可知,船体姿态测量精度直接影响船载光 电经纬仪的测角精度。进而影响海上角度交会测量 精度。船体姿态对船载测量设备测角精度的影响如 式(11)所示<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta A_i = \Delta K + \Delta \psi \sin A_i \tan E_i + \Delta \theta \cos A_i \tan E_i \\ \Delta E_i = \Delta \psi \cos A_i - \Delta \theta \sin A_i \end{cases}$$
(11)

式中, $\Delta K$ 、 $\Delta \phi$  及  $\Delta \theta$  分别为航向测量误差、纵摇测量误差及横摇测量误差。

## 4 仿真分析

如图 3 所示,目标 M 沿平行于 X 轴的轨迹 L 匀 速直线航行,飞行速度为250 m/s,航程为10 000 m。 安装角度交会测量设备的船舶平台沿箭头所指的方 向以5 m/s匀速直线航行。



Fig. 3 The diagram of equipment arrangement

假设设备测角误差、惯导水平测量误差以及站 址定位误差相互独立,且服从高斯分布,惯导航向测 量误差为系统误差。根据目标的理论弹道计算设备 跟踪目标时的方位角和俯仰角,然后仿真分析相关 误差对角度交会测量精度的影响。

## 4.1 交会角

图 4 为跟踪目标时的交会角变化曲线,由图可 知,目标交会角在大部分时段满足 60°~120°的要求。



#### 4.2 船体姿态对交会测量精度的影响

假设惯导水平姿态测量误差为 20",航向测量误 差为 30",根据式(11)计算得到设备测角误差,然后 分析其对交会测量精度的影响,具体如图 5 所示。





当惯导水平误差为 20″、航向误差为 30″时, X、 Y、Z 方向的均方根定位误差分别为0.10 m、0.28 m 和0.91 m;当惯导水平误差为 30″、航向误差为 60″ 时, X、Y、Z 方向的均方根定位误差分别为0.15 m、 0.43 m和1.74 m。由此可知, 船体姿态测量误差通 过影响设备测角误差的方式影响交会测量精度,其 中航向测量误差直接叠加到方位角中,因此航向测 量精度对交会测量精度影响较大, 仿真结果表明, 航

· 1036 ·

向测量误差主要影响 Z 方向的定位精度。

# 4.3 测角误差对交会测量精度的影响

设备测角误差为 20"时,交会测量误差如图 6 所示。



Fig.6 The influence of angle measurement error

X、Y、Z 方向的均方根定位误差分别为0m、 0.41 m和0.52 m;当设备测角误差为40″时,X、Y、Z 方 向的均方根定位误差分别为0m、0.84 m和1.05 m。 由此可知,设备测角误差对角度交会测量精度有一定 的影响,且对 Z 方向的定位精度影响最大。

# 4.4 站址测量误差对交会测量精度的影响

当站址 X、Y、Z方向的定位误差均为8 m时,交 会测量误差曲线如图 7 所示。



Fig.7 The influence of site location error

*X*、*Y*、*Z*方向的交会测量均方根定位误差均为 7.67 m;当 *X*、*Y*、*Z*方向的站址测量误差均为1 m 时,*X*、*Y*、*Z*方向的交会测量均方根定位误差均为 0.97 m。由此可知,站址测量精度将 1:1 影响角度 交会测量精度。

## 4.5 综合误差影响

当设备测角误差为20″、航向测角误差为30″、水

平测量误差为20″、定位误差为1m时,交会测量误差曲线如图8所示。



Fig.8 The influence of total error

*X*、*Y*、*Z*方向的交会测量均方根定位误差分别 为0.98 m、1.09 m和1.37 m;当设备测角误差为 40"、 航向测角误差为 60"、水平测量误差为 30"、定位误差 为8 m时,*X*、*Y*、*Z*方向的交会测量均方根误差分别 为7.78 m、7.84 m和8.04 m。

### 4.6 初步结论

根据以上仿真结果,可以得到如下初步结论:

(1)站址测量误差对角度交会测量精度影响最 大,如要达到1 m交会测量精度,站址定位精度可达 1 m;

(2)船姿测量误差中,航向测量误差对交会测量 精度影响最大,因此应综合利用船载光电经纬仪和 卫星导航系统等设备对惯导误差综合校准;

(3)设备测角误差对角度交会测量精度有一定的影响,如要达到1 m交会测量精度,设备测角精度 应优于 20";

(4)当目标航线较长时,两台光电经纬仪难以保 证交会角在全程均满足 60°~120°要求,此时可以采 用多站接力方式解决。

# 5 结束语

随着目标弹道和落点测量精度要求的不断提高,现有测量船单站 REA 定位测量体制已难于满足海上飞行器的高精度测量需求。本文在分析陆基靶场交会测量技术的基础上,提出了海上角度交会测量方案,仿真分析了船体姿态测量误差、设备测角误差、站址测量误差以及综合因素对海上交会测量精度的影响。仿真结果表明,只要设备精度指标选择得当,海上角度交会测量有望达到米级精度。本文

仅从精度角度分析了海上角度交会测量技术的可行性,后续工程设计时,还需深入研究并解决船体姿态、站址位置的高速测量、目标图像信息的高速存储 及传输等技术难题。

# 参考文献:

- [1] 江文达,陈道桂. 航天测量船[M].北京:国防工业出版 社,2002.
   JIANG Wen-da, CHEN Dao-gui. Space Tracking, Telemetry and command Ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 顾青,毛建民.光电经纬仪空中轨迹交会测量方法研究及误差分析[J].地矿测绘,2009,25(1):12-16.
   GU Qing, MAO Jian-min. Research on Photoelectric Theodolite Intersection Based on Air Trajectory Testing Methods and Its Error[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources,2009,25(1):12-16. (in Chinese)
- [3] 谢卫红,张明. 航天测控系统[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.
   XIE Wei-hong, ZHANG Ming. Space Tracking, Telemetry and Command Systems[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press,2000. (in Chinese)
- [4] 杨增学,杨世宏,宁双侠,等.常规兵器试验交会测量 方法及应用[M].西安:西安交通大学出版社,2010.
  YANG Zeng-xue, YANG Shi-hong, NING Shuang-xia, et al. Conventional Weapons Test Base on Intersection Method and its applications[M]. Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 2010. (in Chinese)
- [5] 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 De-yong, LI Xiao-yong, WANG Xu-liang, 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)
- [6] Musoff H, Murphy J H. A Study of Strapdown Navigation Algorithms[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1995, 18(2): 287 – 290.
- [7] Le A Q, Tiberius C. Single-frequency Precise Point Positioning with Optimal Filtering[J]. GPS Solutions, 2007, 11(1): 61 - 69.
- [8] Zumbege J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. Geophys Research, 1997, 102(B3): 5005 – 5017.
- [9] Carlson N A. Federated Filter for Fault-tolerant Integrated Navigation systems[C]//Proceedings of IEEE PLANS 1988. Orlando, FL: IEEE, 1988:110 – 119.
- [10] 金伟,刘百奇,宫晓琳,等.惯性/天文/卫星组合导航 技术[M].北京:国防工业出版社,2011.
  JIN Wei, LIU Bai-qi, GONG Xiao-lin, et al. INS/CNS/ GNSS Integrated Navigation technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2011. (in Chinese)
- [11] 张同双,钟德安,李晓勇.基于递推最小二乘算法的

惯导姿态误差动态标定方法[J]. 电讯技术,2011,51 (8):11-15.

ZHANG Tong-shuang, ZHONG De-an, LI Xiao-yong. Dynamic Calibration Method of Attitude Error for Integrated Navigation System Based on RLS Algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(8); 11 - 15. (in Chinese)

#### 作者简介:



**张同双**(1968—),男,江苏泗阳人,1993 年于重庆大学获学士学位,2006年于中国科 学技术大学获硕士学位,现为高级工程师,主 要研究方向为船姿船位测量技术;

ZHANG Tong-shuang was born in Siyang, Jiangsu Province, in 1968. He received the B.S. degree from Chongqing University and the M.S.

degree from University of Science and Technology of China in 1993 and 2006, respectively. He is now a senior engineer. His research concerns attitude and position determination technique for TT&C measurement equipment.

Email: zts\_123@163.com

**傅敏辉**(1972—),男,江西新余人,2011年于南京大学获 硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为高速飞行器海 上测量技术;

FU Min-hui was born in Xinyu, Jiangxi Province, in 1972. He received the M.S. degree from Nanjing University in 2011. He is now a senior engineer. His research concerns ocean-based high speed flight vehicle measurement techniques.

 $Email: csmtc_fmh@163.com$ 

**钟德安**(1964—),男,江苏江阴人,1990年于东南大学获 硕士学位,现为研究员,主要研究方向为测量船标校技术;

ZHONG De-an was born in Jiangyin, Jiangsu Province, in 1964. He received the M.S. degree from Southeast University in 1990. He is now a senior engineer of professor. His research concerns calibration techniques for TT&C ship's measurement equipment.

Email:zda1014 @126.com

**郭敬明**(1985—),男,湖北荆州人,2005年于西安电子科 技大学获学士学位,2008年于上海交通大学获硕士学位,现 为博士研究生、助理研究员,主要从事光电设备测量、星敏感 器船体姿态测量方面的研究;

GUO Jing-ming was born in Jingzhou, Hubei Province, in 1985. He received the B.S. degree from Xidian University and the M.S. degree from Shanghai Jiaotong University in 2005 and 2008, respectively. He is now an research associate and currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns star sensor and digital image processing.

Email:gjm441@163.com

**王二建**(1982一),男,江苏淮安人,2006年于装甲兵工程 学院获硕士学位,现为工程师,主要从事航天测控技术研究。

WANG Er-jian was born in Huai' an, Jiangsu Province, in 1982. He received the M.S. degree from Armed Force and Engineer Institute in 2006. He is now an engineer. His research concerns spacecraft TT&C technology.

Email: hk\_zgy@126.com