

文章编号 1004-924X(2013)12-3133-08

机载光电测量设备目标自主定位误差分析

檀立刚^{1,2*}, 戴明¹, 刘晶红¹, 宋悦铭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 研究生院 北京 100039)

摘要: 为了提高机载光电测量设备定位精度, 搭建了机载光电测量设备目标自主定位系统。利用齐次坐标转换的方法, 构建了机载测量系统跟踪目标时的目标定位方程和定位误差方程, 并利用蒙特卡洛法分析目标自主定位误差。引入小波分析理论对定位误差进行优化以提高目标自主定位精度。对实验数据和飞行实测数据进行了分析, 结果显示, 采用小波分析理论优化目标自主定位误差可以大幅提高目标自主定位精度, 提高幅度达到 70%, 得到的结果验证了目标自主定位技术的可行性和优越性。文中的分析方法和内容同样也适用于地面跟踪测量平台和舰载跟踪测量设备。

关键词: 机载光电测量设备; 目标自主定位; 坐标转换; 误差分析; 小波分析

中图分类号: V443.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3133

Error analysis of target automatic positioning for airborne photo-electric measuring device

TAN Li-gang^{1,2*}, DAI Ming¹, LIU Jing-hong¹, SONG Yue-ming¹

(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*)

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

Abstract: To improve the accuracy of a photo-electric measuring device, an automatic positioning system for airborne photo-electric reconnaissance equipment was established. Firstly, the positioning equation and error equation of the target automatic positioning technology were constructed based on homogeneous coordinate conversion, and the Monte Carlo analysis method was used to analyze the error of the target automatic positioning technology. Then, the wavelet analysis theory was brought to optimize the positioning error to improve the position accuracy. By analyzing experimental data and flight test data, it shows that optimizing the target automatic positioning technology by wavelet analysis theory can substantially improve the target automatic positioning precision by 70%. These results verify the feasibility and superiority of the target automatic positioning technology. The analysis method is also applies to surface tracking and measuring platforms and the ship-based tracking and measuring equipment.

Key words: airborne photo-electric measuring device; target automatic positioning; coordinate conversion; error analysis; wavelet analysis

收稿日期: 2013-05-01; 修订日期: 2013-06-15.

基金项目: 国家重点基金资助项目 (No. 2008AA121803); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB72400607)

1 引言

近年来,机载光电测量设备在军用和民用领域的应用越来越广泛,同时对机载光电测量设备性能要求也越来越严格,尤其对衡量光电测量设备性能的重要指标,测量精度的要求越来越高。这是因为测量精度越高,获得的目标细节信息越多,越有利于对敌情、地形等作战情报进行分析,和为决策者的正确指挥提供重要保障。目前,随着现代科技进步和战争的需求,仅仅得到目标在光电测量设备视场中的视轴位置信息(方位、俯仰、距离)已经不能满足需求,人们希望实时获得探测目标的大地坐标,并将其呈现于既定的电子地图上,以便能实时对敌打击和分析战场形势。

机载光电测量平台能实时对地面目标跟踪、测量,但不能独立完成目标定位;而是需要把自身相对于飞机平台的姿态角、地面目标相对于飞机的激光测距值和机载光电测量平台的视轴位置信息(地面目标位于视轴方向)等数据传递给飞机平台,飞机平台将获得的所有信息与 GPS 接收机、惯导数据融合,经坐标变换后才能完成目标定位。机载光电测量平台辅助飞机平台完成目标定位需要经过与飞机平台进行标校、数据通讯、时钟同步等步骤,从而延长了系统的研制周期。

机载光电测量平台目标自主定位技术整合了 GPS 接收机和航空姿态测量系统于机载光电测量平台顶部,由机载光电测量平台独自实现目标定位功能。目标自主定位技术使机载光电测量平台应用更加灵活,可随意挂载于飞机平台上,降低了对飞机平台的性能要求,缩短了联调周期,节约了成本^[1-2]。这种定位技术的应用范围可扩展至车载、舰载等领域,可促进我国现代化国防事业的发展。本文针对机载光电测量平台目标自主定位技术定位误差进行了分析研究,将小波分析理论用于机载目标自主定位技术,有效提高了目标自主定位精度。

2 目标自主定位实现过程

与常规目标定位技术相比,目标自主定位技术减少了框架坐标系与基座坐标系引起的误差。

该技术根据实现目标自主定位的机载光电测量平台的物理模型,建立辅助坐标系,由各辅助坐标系之间的关系建立目标自主定位坐标转换方程,通过该方程求解地面目标大地坐标。

2.1 辅助坐标系的建立^[9]

(1) 大地坐标系 $A(O_A - X_A Y_A Z_A)$

大地坐标系是 WGS84 大地坐标系的简称。原点位于地球质心, Z_C 轴由原点指向地球北极方向, X_C 轴指向格林尼治零子午面与地球赤道交点, Y_C 轴垂直于平面 $X_C O_C Z_C$,与 Z_C 轴, X_C 轴构成右手螺旋坐标系。大地坐标系中某点坐标用 (B, L, H) 表示,代表该点纬度、经度和大地高程。

(2) 空间大地直角坐标系 $B(O_B - X_B Y_B Z_B)$

空间大地直角坐标系与大地坐标系具有相同的坐标原点,三轴指向也完全重合,不同的是,空间大地直角坐标系是空间笛卡尔直角坐标系,大地坐标系是椭球坐标系。空间大地直角坐标系中某点坐标用 (X_B, Y_B, Z_B) 表示。

(3) 地理坐标系 $C(O_C - X_C Y_C Z_C)$

地理坐标系原点位于某一时刻机载光电测量平台所处的位置,设某时刻机载光电测量平台大地坐标为 (B_0, L_0, H_0) , Z_C 轴正方向由原点指向正北方向, X_C 轴指向天顶方向, Y_C 轴与 Z_C 轴, X_C 轴构成右手螺旋坐标系。地理坐标系中某点坐标表示为 (X_C, Y_C, Z_C) 。

(4) 机载光电测量平台坐标系 $D(O_D - X_D Y_D Z_D)$

机载光电测量平台坐标系原点与地理坐标系原点重合,三轴指向为地理坐标系绕三轴旋转机载光电测量平台某时刻姿态角后三轴方向,即当机载光电测量平台三轴姿态角为 0 时,机载光电测量平台坐标系与地理坐标系重合。设机载光电测量平台三轴姿态角 $\epsilon, \theta, \lambda$,分别表示航向角、俯仰角和横滚角,则机载光电测量平台坐标系为地理坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$ 分别是绕 X_C 轴旋转 ϵ ,绕 Y_C 轴旋转 θ ,绕 Z_C 轴旋转 λ 后所成的坐标系。机载光电测量平台坐标系中某点坐标用 (X_D, Y_D, Z_D) 表示。

(5) 目标地面坐标系 $E(O_E - X_E Y_E Z_E)$

目标地面坐标系原点位于视轴与地平面的交点位置,三轴指向与光电测量平台三轴指向一致。目标地面坐标系中某点坐标用 (X_E, Y_E, Z_E) 表示。目标地面坐标系相当于光电测量平台坐标系在空

间笛卡尔直角坐标系下的平移。

2.2 目标自主定位坐标转换过程

目标自主定位坐标转换将地面目标在目标地面坐标系下坐标转换成地面目标在大地坐标系下坐标的过程,将地面目标位置信息标定于既定的电子地图上。所获得的数据信息为目标地面坐标系下的信息,而最终要求得的是地面目标大地坐标。

2.2.1 从目标地面大地坐标系转换为机载光电测量平台坐标系

设地面目标在目标地面坐标系下坐标为 (X_E, Y_E, Z_E) ,在机载光电测量平台坐标系下坐标为 (X_D, Y_D, Z_D) ,机载光电测量平台视轴位置信息为 (α, β) ,激光测距机输出值为 R 。目标地面坐标系原点在机载光电测量平台坐标系下坐标可由 (α, β, R) 求得。目标地面坐标系原点在机载光电测量平台坐标系下坐标设为 (X_{DE}, Y_{DE}, Z_{DE}) ,则:

$$\begin{bmatrix} X_{DE} \\ Y_{DE} \\ Z_{DE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \alpha \cos \beta \\ R \sin \alpha \cos \beta \\ R \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

则地面目标在机载光电测量平台坐标系下坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{DE} \\ Y_{DE} \\ Z_{DE} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

一般地面目标位于视轴方向上,即目标地面坐标系原点 $(X_E, Y_E, Z_E) = (0, 0, 0)$ 。

2.2.2 从机载光电测量平台坐标系转换为地理坐标系

机载光电测量平台坐标系依次绕 Z_D 轴旋转 λ ,绕 Y_D 轴旋转 θ ,绕 X_D 轴旋转 ϵ 后即变为地理坐标系。地面目标在地理坐标系下坐标 (X_C, Y_C, Z_C) 为:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon & \sin \epsilon \\ 0 & -\sin \epsilon & \cos \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.2.3 从地理坐标系转换为空间大地直角坐标系

设地理坐标系坐标原点大地坐标为 (B_0, L_0, H_0) ,地理坐标系依次沿 X_C 轴平移 $-H_0$, Y_C 轴旋

转 B_0 ,绕 Z_C 轴旋转 $-L_0$,再沿旋转后的 Z_C 轴平移 $Ne^2 \sin B_0$ 后转换为空间大地直角坐标系。地面目标在空间大地直角坐标系下坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos B_0 & 0 & -\sin B_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin B_0 & 0 & \cos B_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos L_0 & \sin L_0 & 0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_C + H_0 \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -Ne^2 \sin B_0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

图 1 所示为地球直角坐标系和地理坐标系示意图。

2.2.4 从空间大地直角坐标系转换为大地坐标系

从空间大地直角坐标系转换为大地坐标系由近似的直接转换公式^[3-4]:

$$U = \arctan\left(\frac{Z_B a}{\sqrt{X_B^2 + Y_B^2} b}\right), \quad (5)$$

$$B = \frac{\arctan(Z_B + be'^2 \sin^3 U)}{(\sqrt{X_B^2 + Y_B^2} - ae^2 \cos^3 U)}, \quad (6)$$

$$L = \arctan \frac{Y_B}{X_B}, \quad (7)$$

$$H = \frac{Z_B}{\sin B - N(1 - e^2)}, \quad (8)$$

式中: N 为卯西圈曲率半径; e 为椭圆第一偏心率; e' 为椭圆第二偏心率; a 为椭球长半径; b 为椭球短半径。

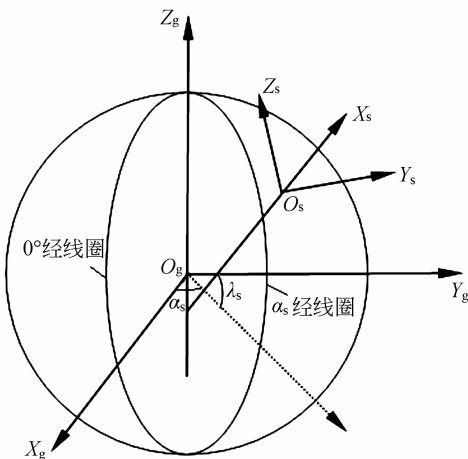


图 1 地球直角坐标系和地理坐标系示意图
Fig. 1 Earth cartesian coordinates and geographic coordinates

3 目标自主定位误差分析^[5-7]

误差分析是衡量定位方法优劣的重要环节。本文采用蒙特卡洛统计试验法获得 10 000 组目标自主定位误差值,通过小波分析对误差值进行分析优化,降噪重构后获得更精确误差分布。

蒙特卡洛法的理论基础:

大数定理:设 x_1, x_2, \dots, x_n 是 n 个独立的随机变量,若它们来自同一母体,有相同的分布,且有相同有限的均值和方差,分别用 μ 和 σ_2 来表示,则对于任意的 $\epsilon > 0$ 有:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \mu\right| \geq \epsilon\right) = 0. \quad (9)$$

根据伯努利定理:若随机事件 A 发生的概率为 $P(A)$,在 n 次独立实验中,事件 A 发生的频数为 m ,频率为 $W(A) = m/n$,则对于任意的 $\epsilon > 0$ 有:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{m}{n} - P(A)\right| < \epsilon\right) = 1. \quad (10)$$

利用蒙特卡洛法建立目标自主定位误差模型:

$$[\Delta B \quad \Delta L \quad \Delta H]^T = F'(X) - F'(X - \Delta X), \quad (11)$$

式中: $\Delta B, \Delta L, \Delta H$ 代表定位误差; ΔX 代表定位参数误差。

文中涉及 9 个误差随机变量均采用正态分布描述,误差模型为 $\Delta X = P_{i,j} \sigma_j$, $P_{i,j}$ 是由 MATLAB rand 函数产生的伪随机数, σ_j 为各设备给定误差, $i = 1, 2, \dots, n$ ($n = 10\ 000$ 为样本空间); $j = 1, 2, \dots, 9$ 。目标自主定位误差仿真实验用到数据如表 1 所示。

仿真过程的步骤:

(1)由测量得到的各参数真值计算定位结果(B, L, H),作为误差分析中目标物体的名义值;

(2)产生各参数的随机序列,附加到各测量值中;

(3)计算附加随机序列后所得的定位结果;

(4)计算 $(\Delta Bi, \Delta Li, \Delta Hi) = (Bi, Li, Hi) - (B, L, H)$;

(5)对统计得到的 $(\Delta Bi, \Delta Li, \Delta Hi)$ 进行曲线拟合求取误差分布并输出结果。

表 1 仿真实验数据

Tab. 1 Data in simulation program

名称	符号	名义值	误差 σ
测量平台大地经度	$B_0/(\circ)$	125.354 4	2×10^{-4}
测量平台大地纬度	$L_0/(\circ)$	43.886 5	2×10^{-4}
测量平台大地高程	H_0/m	2 000	10
测量平台俯仰角	$\theta/(\circ)$	3.5	0.5
测量平台横滚角	$\lambda/(\circ)$	4.5	0.5
测量平台航向角	$\epsilon/(\circ)$	30.6	0.2
视轴方位角	$\alpha/(\circ)$	-34.74	0.02
视轴俯仰角	$\beta/(\circ)$	-124.44	0.02
目标到测量平台距离	R/m	2 500	5

统计得到的 $(\Delta Bi, \Delta Li, \Delta Hi)$ 各量称为 EB, EL, EH ,分别对 EB, EL, EH 做小波分析,进行降噪、重构处理,优化误差分布。

3.1 定位计算结果

将表 1 中数据代入仿真计算程序,求得目标自主定位计算结果如表 2 所示。

表 2 目标自主定位结果

Tab. 2 Results of orientation process

名称	符号	名义值	误差 σ
目标大地纬度	$B/(\circ)$	43.899 1	0.000 242
目标大地经度	$L/(\circ)$	125.326 8	0.000 275
目标大地高程	H/m	1 166.49	16

3.2 蒙特卡洛统计实验

将表 1 和表 2 中的数据作为名义值代入目标自主定位误差分析程序,计算得到 10 000 组定位误差值和空间位置分布如图 2 所示。

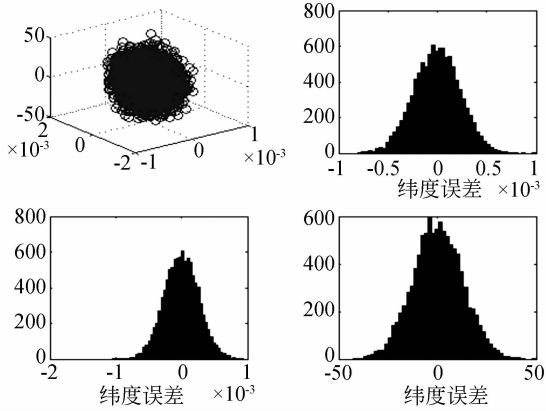


图 2 目标的大地坐标误差和空间位置分布

Fig. 2 Geodetic coordinate errors and spatial location distribution of the target

通过蒙特卡洛统计实验,可以获得目标大地坐标误差值,分别用 EB, EL, EH 表示。对 EB, EL, EH 进行简单曲线拟合,得到三者大致分布参数,如图 3 和表 3 所示。

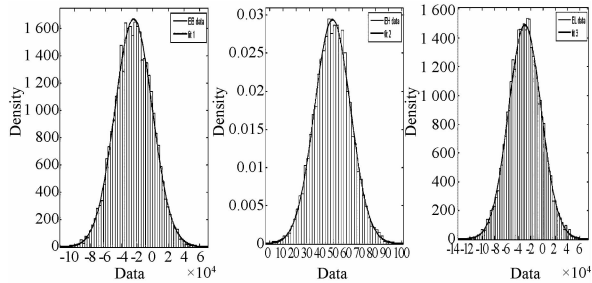


图 3 经曲线拟合后纬度、经度和高度的误差统计分布

Fig. 3 Statistic distribution of latitude, longitude and altitude errors after curve fitting

表 3 纬度、经度、高度误差分布参数

Tab. 3 Distribution parameters of latitude, longitude and altitude errors

名称	平均值 μ	标准差 σ	分布
纬度误差 EB	$-4.10 \times 10^{-6} \text{ }^\circ$	$2.33 \times 10^{-4} \text{ }^\circ$	正态分布
经度误差 EL	$1.22 \times 10^{-6} \text{ }^\circ$	$2.60 \times 10^{-4} \text{ }^\circ$	正态分布
大地高程误差 EH	0.26 m	13.60 m	正态分布

3.3 小波分析

小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定但其形状可改变,时间窗和频率窗都可改变的视场局域化分析方法,在低频部分具有较高的

频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,故其具有对信号的自适应性^[8]。

由蒙特卡洛统计试验获得了定位误差 EB, EL, EH ,对三者进行小波分析。

这里选择 Coiflet(Coif 1)小波进行 5 层小波分解,Coiflet(Coif 1)小波基函数 $\Psi(t)$ 的 $2N$ 阶矩为 0,尺度函数 $f(t)$ 的 $2N-1$ 阶矩为 0。 $\Psi(t)$ 和 $f(t)$ 的支撑长度为 $6N-1$ 。

以纬度误差 EB 为例进行小波分析,其步骤如下:

(1)导入纬度误差值 EB ,对 EB 信号进行小波分解如图 4 所示。

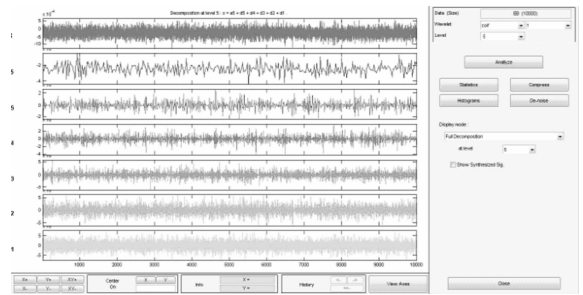


图 4 EB 小波分解图

Fig. 4 Wavelet analysis of EB

将纬度误差值 EB 分解为低频分量 a_5 和 5 个高频分量 $d_n (n=1 \sim 5)$, EB 误差原始信号可表示为:

$$s = a_5 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1$$

(2)对原始信号及各高频分量进行统计,统计结果如图 5 所示。

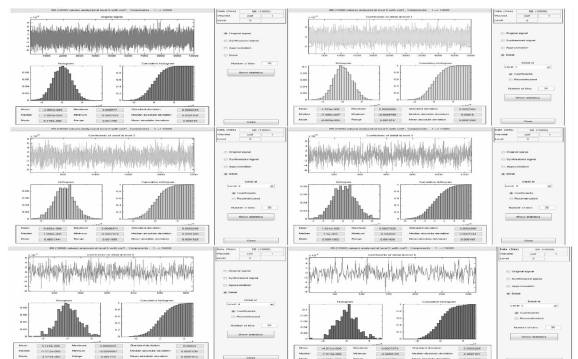


图 5 EB 原始信号和高频信号统计分布图

Fig. 5 Statistic distribution of original signal and high frequency signal

由图 5 可以看出原始信号及各高频分量均服从正态分布,分布参数如表 4 所示。

表 4 原始信号及高频分量分布参数

Tab. 4 Distribution parameters of original signal and high frequency signal

分量	均值/(°)	标准差/(°)	分布
s	-4.099×10^{-4}	2.333×10^{-4}	正态
d_1	4.533×10^{-6}	2.364×10^{-4}	正态
d_2	9.862×10^{-6}	2.296×10^{-4}	正态
d_3	1.421×10^{-5}	2.306×10^{-4}	正态
d_4	3.124×10^{-6}	2.300×10^{-4}	正态
d_5	-4.012×10^{-6}	2.287×10^{-4}	正态

(3)对 EB 误差信号进行降噪处理,并进行重构,重构后 EB 误差分布如图 6 所示。

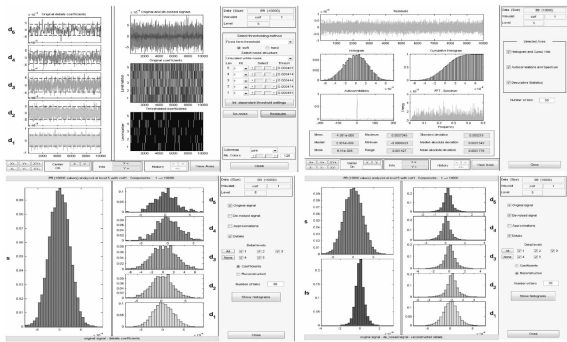


图 6 EB 误差降噪重构示意图

Fig. 6 Noise reduction and reconstruction of EB

由图 6 可以看出,对 EB 误差信号进行降噪处理,重构信号与原始信号相比,标准差得到明显优化,定位误差大幅提高。重构信号各分量统计参数如表 5 所示。

表 5 重构信号统计分布参数

Tab. 5 Statistic distribution parameters of reconstruction signal

分量	均值/(°)	标准差/(°)	分布
d_s	-4.056×10^{-6}	4.875×10^{-5}	正态
d_1	-1.5×10^{-9}	1.672×10^{-4}	正态
d_2	-1.202×10^{-8}	1.149×10^{-4}	正态
d_3	8.348×10^{-9}	8.165×10^{-5}	正态
d_4	-1.428×10^{-8}	5.748×10^{-5}	正态
d_5	-3.425×10^{-8}	4.052×10^{-5}	正态

对比表 4 和表 5 可知, EB 误差原始信号 s 服从 $\mu = -4.099 \times 10^{-6} (^\circ)$, $\sigma = 2.333 \times 10^{-4} (^\circ)$ 的正态分布;重构信号 d_s 服从 $\mu = -4.056 \times 10^{-6} (^\circ)$, $\sigma = 5.875 \times 10^{-5} (^\circ)$ 的正态分布。由此可见,目标自主定位技术纬度定位误差由 $2.333 \times 10^{-4} (^\circ)$ 提高到 $5.875 \times 10^{-5} (^\circ)$,提高幅度为 75%。

之后分别就高度误差 EH 和经度误差 EL 做同样的小波分析处理,得到降噪前后原始信号和重构信号的分布情况如表 6 所示。

表 6 纬度、高度、经度重构前后分布参数

Tab. 6 Statistic distribution parameters of latitude, longitude and altitude errors of original and reconstruction signals

名称	平均值	标准差
$EB_s/(^\circ)$	-4.099×10^{-6}	2.333×10^{-4}
$EBd_s/(^\circ)$	-4.056×10^{-6}	5.875×10^{-5}
$\Delta EB/(^\circ)$	4.3×10^{-8} (基本不变)	1.7455×10^{-4} (75%)
EH_s/m	0.261 1	12.60
EHd_s/m	0.256	3.229
$\Delta EH/m$	5.1×10^{-3}	9.371 (74%)
$EL_s/(^\circ)$	-1.218×10^{-6}	2.602×10^{-4}
$ELd_s/(^\circ)$	-1.220×10^{-6}	5.851×10^{-5}
$\Delta EL/(^\circ)$	2×10^{-9} (基本不变)	2.0169×10^{-4} (78%)

通过小波分析处理,大大提高了目标自主定位精度。 EH 误差原始信号 s 服从 $\mu = 0.2611 \text{ m}$, $\sigma = 12.60 \text{ m}$ 的正态分布;重构信号 d_s 服从 $\mu = 0.256 \text{ m}$, $\sigma = 3.229 \text{ m}$ 的正态分布,高度误差由 12.6 m 提高到 3.229 m,提高幅度为 74%。 EL 误差原始信号 s 服从 $\mu = -1.218 \times 10^{-6} (^\circ)$, $\sigma = 2.602 \times 10^{-4} (^\circ)$ 的正态分布;重构信号 d_s 服从 $\mu = -1.22 \times 10^{-6} (^\circ)$, $\sigma = 5.851 \times 10^{-5} (^\circ)$ 的正态分布,目标自主定位技术纬度定位误差由 $2.602 \times 10^{-4} (^\circ)$ 提高到 $5.851 \times 10^{-5} (^\circ)$ 提高幅度为 78%。在实际的目标自主定位过程中,相当于目标自主定位经度精度由 26 m 提高到 5.8 m;高度精度由 12.6 m 提高到 3.2 m;纬度精度由 23 m 提高到 5.8 m,大大提高了目标定位的精确度。

4 结 论

本文利用齐次坐标转换的方法,推导了机载测量系统跟踪目标时的目标定位方程和引导方程,并且引入小波分析理论,利用 Matlab 编写了误差仿真程序,将目标自主定位精度提高了70%。同时,通过改变仿真参数的输入值进行

分析计算和比较,发现姿态角,方位角和距离对目标的定位精度影响较大;而影响引导数据精度的最主要因素是目标与飞机间的距离和目标位置数据的精度。

实验数据分析证明了齐次坐标转化法在定位与引导过程中应用的正确性,其精度也在仿真精度范围之内。文中的分析方法同样适用于地面跟踪测量平台和舰载跟踪测量设备。

参考文献:

- [1] 王家骥,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程,2005,13(2):105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 13(2):105-116. (in Chinese)
- [2] 刘晶红,孙辉,张葆,等. 航空光电成像平台的目标自主定位[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1305-1310.
LIU J H, SUN H, ZHANG B, *et al.*. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric platform [J]. *Opt. precision Eng.*, 2007, 15(8):1305-1310. (in Chinese)
- [3] 张华海,王军,郑南山,等. 由空间直角坐标计算大地坐标的简便公式[J]. 全球定位系统,2002,4:9-12.
ZHANG H H, WANG J, ZHENG N SH, *et al.*. The simple formula to compute geodetic coordinate from rectangular space coordinate [J]. *GPS world of china*, 2002,4: 9-12. (in Chinese)
- [4] 李晓光,王兆楠,王智,等. 一种目标位置解算方法[J]. 光学精密工程,2006,13(6):1076-1081.
LI X G, WANG ZH N, WANG ZH, *et al.*. Research on location compute method of object [J]. *Opt. precision Eng.*, 2006,13(6):1076-1081. (in Chinese)
- [5] 金光,王家骥. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程,1999,7(5):89-94.
JIN G, WANG J Q. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation [J]. *Opt. precision Eng.*, 1999,7(5):89-94. (in Chinese)
- [6] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
FEI Y T. *The Theory of Error and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [7] 金光. 机载光电跟踪测量的目标定位误差分析和研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2001.
JIN G. *Aircraft-borne photo electricity track survey localization of target error analysis and research* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
- [8] 葛哲学. 小波分析理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
GE ZH X. *Wavelet analysis theory and realize by MATLAB R2007* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [9] 朱华统. 大地坐标系的建立[M]. 北京:测绘出版社
ZHU H T. *The foundation of geodetic coordinates* [M]. Beijing: Survey and Mapping Press. (in Chinese)

作者简介:



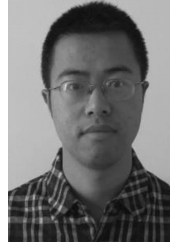
檀立刚(1983—),男,河北秦皇岛人,博士研究生,主要从事机载光电侦察设备目标自主定位技术方向的研究。E-mail: tlgbb@163.com



刘晶红(1967—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。E-mail: liu1577@126.com



戴明(1965—),男,湖北潜江人,研究员,博士生导师,1993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,主要从事光电平台稳定技术、图像稳定技术及航空光电成像技术方面的研究。E-mail: daim@vip.sina.com



宋悦铭(1981—),男,吉林人,2007年于吉林大学获得硕士学位,主要从事机载光电平台电控系统构建,地面动目标定位、引导解算等工作。E-mail: songym525@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)