

光学无线电测量信息融合定位方法

柴 敏^{1,2} 余 慧² 宋卫红² 杨小燕²

(¹ 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)
(² 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

摘要 在外弹道测量系统中,将光学设备与无线电设备测量数据进行融合处理,可以提高系统的综合测量水平和设备的使用效率。利用部署在光电经纬仪附近的雷达,建立光电经纬仪和雷达联测定位模型。由全微分公式,根据测站站址差将光电经纬仪的测角信息与雷达的测距信息进行数据融合,可以得到目标相对于雷达的方位角和俯仰角,从而确定目标的空间三维位置;分析了定位模型的主要误差来源和对定位结果的影响。结果表明,光电经纬仪雷达联合定位算法得到的精度优于雷达单台定位精度,联合定位的精度达到 2 m 以内,同时发挥了光电经纬仪和雷达跟踪测量的长处。

关键词 测量;数据融合;目标定位;光电经纬仪;雷达

中图分类号 V556.2; TH761.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.1212002

Joint Positioning Method for Data Fusion of Photo-Electric Theodolite and Radar

Chai Min^{1,2} Yu Hui² Song Weihong² Yang Xiaoyan²

(¹ State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an, Shaanxi 710043, China)
(² Xi'an Satellite Control Center, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract In an exterior ballistic measurement system, data fusion for optical measuring equipment and radio exterior trajectory measuring system is very effective to improve the comprehensive precision of target measurement and the utilization rate of instrumentations. According to a joint positioning model with photo-electric theodolite and nearby radar, data fusion of the angular-position data obtained from theodolite and the ranging data obtained from radars will be implemented by using total differential formula and the difference of measuring station sites. It is natural to figure out the target's azimuth and pitching angle, and then the target's three-dimensional position in space. The main error sources of the positioning model are analyzed, as well as their influence for positioning results. The analysis results show that the joint positioning accuracy of photo-electric theodolite and radar has an advantage over the accuracy computed by single radar positioning data. The precision of the joint positioning method is within 2 m, which is an obvious expression of the high angular measurement accuracy of photo-electric theodolite and high range measurement accuracy of radar.

Key words measurement; data fusion; target positioning; photo-electric theodolite; radar

OCIS codes 120.6085; 280.5600; 200.4560

1 引 言

光电经纬仪一直是靶场试验中对空中飞行目标进行外弹道测量的主要手段,具有操作简单、工作可靠和测量精度高等优点,通常只能测量目标的角度位置,只有少数加装了激光测距装置才可以得到测

距信息,但受多方面因素影响,多数情况下激光回波率较低,很难得到连续的测距信息,测量效果不是很理想^[1~7]。雷达在靶场试验中被广泛使用,它可以提供较高精度的测距信息,但测角精度较低。国外的导弹航天靶场很重视靶场光电跟踪测量系统的建

收稿日期: 2012-06-15; **收到修改稿日期:** 2012-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(11026224)资助课题。

作者简介: 柴 敏(1964—),女,本科,高级工程师,主要从事外弹道数据处理和分析、数据融合等方面的研究。

E-mail: 13991177352@163.com

设和发展,其设备型号多、数量多、测量精度高、更新换代快,为了充分发挥光学和无线电各自的优点,有部分靶场将光电经纬仪和雷达集成在一起来达到单站定位的目的,但是这样的集成系统造价昂贵、研制复杂,并且雷达和经纬仪往往只能联合一起工作^[8~15]。

目前,在我国的现代靶场测量系统中,确定飞行目标空间坐标的方法一般有光电经纬仪交会测量定位和雷达测量定位(包括单台定位和交会测量)。众所周知,雷达的单台定位或多台交会测量定位精度较低。光电经纬仪的测角精度较高,但由于在飞行目标上安装激光合作目标受限制,目前大部分经纬仪没有测距功能,只能利用两台或多台经纬仪交会测量给出飞行目标的空间坐标^[2,8,9]。为能充分利用光学高精度测角和雷达高精度测距的特点,同时也为了跟踪测量的连续性,在跟踪测量链既有光电经纬仪设备又有雷达设备时,将雷达的测距数据和经纬仪测角数据进行融合,实现联合交会定位,可提高系统的综合测量水平和设备的使用效率。本文从单站定位的角度出发,提出利用经纬仪测角信息和同站附近的雷达测距信息,建立光电经纬仪-雷达联合定位模型,并用实际数据验证了其有效性。

2 坐标系之间的转换

空间飞行目标的外弹道测量需要以地球上一定的参考坐标系为参照,而参考坐标系的建立又依赖于大地测量方法和大地参数的选择。我国的武器制导系统和运载火箭飞行试验外弹道的测量常应用

DX-1号参考椭球体参数,采用DX-1号或DX-2号地心直角坐标系。光电经纬仪和雷达的角度方位角 A 和俯仰角 E 的测量都与水平面有关,常采用垂线测量坐标系。依据自己的方便和习惯,武器制导系统、作战部门、各种外测系统往往使用不同的坐标系,但在最终的外弹道处理中,必须将它们统一到同一坐标系,通常情况是统一到发射坐标系,这就需要进行坐标系之间的转换^[2,4,9]。

2.1 坐标系的关系

在地面上两点建立两个直角坐标系,目的是求出测站坐标系 $(O_c; X_c, Y_c, Z_c)$ 到发射坐标系 $(O_f; X_f, Y_f, Z_f)$ 的转换公式。大地坐标系、测站坐标系和发射坐标系的关系如图1所示^[2,6,9]。

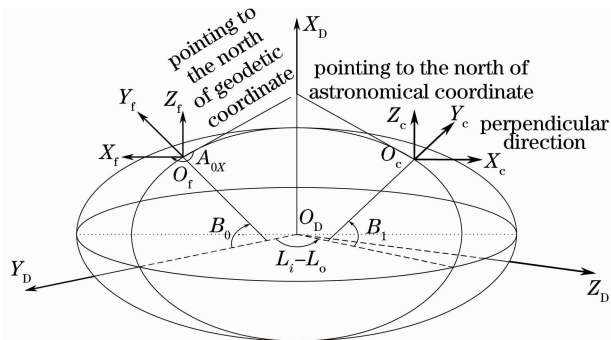


图1 坐标关系示意图

Fig. 1 Illustration of the coordinate relation

2.2 大地坐标系转换到发射坐标系

设 O 为发射坐标系原点,它的大地坐标为 (L_f, B_f, H_f) ,垂线偏差为 ξ_0, η_0, A_{0x} 为发射方位角;测量点的大地坐标为 (L_i, B_i, H_i) ,测量点垂线偏差为 ξ_i, η_i 。

其模型修正公式为

$$N_f = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_f}}, \quad N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_i}}, \quad \begin{cases} \tilde{x}_{0f} = [N_f(1 - e^2) + H_f] \sin B_f \\ \tilde{y}_{0f} = (N_f + H_f) \cos B_f \cos L_f \\ \tilde{z}_{0f} = (N_f + H_f) \cos B_f \sin L_f \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tilde{x}_{0i} = [N_i(1 - e^2) + H_i] \sin B_i \\ \tilde{y}_{0i} = (N_i + H_i) \cos B_i \cos L_i \\ \tilde{z}_{0i} = (N_i + H_i) \cos B_i \sin L_i \end{cases},$$

式中 a, e 分别为DX-2号参考椭球体的长半轴和第一偏心率。其转换矩阵为

$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos L_f & -\sin L_f \\ 0 & \sin L_f & \cos L_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \cos B_f & \sin B_f & 0 \\ -\sin B_f & \cos B_f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{0x} = \begin{bmatrix} \cos A_{0x} & 0 & -\sin A_{0x} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_{0x} & 0 & \cos A_{0x} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U}_0 = \begin{bmatrix} 1 & \xi_0 & \gamma_0 \\ -\xi_0 & 1 & -\eta_0 \\ -\gamma_0 & \eta_0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \gamma_0 = \eta_0 \tan B_f. \quad (2)$$

故由大地坐标系转换到发射坐标系的转换公式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{L}_0^T \mathbf{B}_0^T \mathbf{A}_{0X}^T \mathbf{U}_0^T \begin{bmatrix} \tilde{x}_{0i} - \tilde{x}_{0f} \\ \tilde{y}_{0i} - \tilde{y}_{0f} \\ \tilde{z}_{0i} - \tilde{z}_{0f} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 (X, Y, Z) 即为大地坐标转换为发射坐标系下的量值。

2.3 测站坐标系与发射坐标系之间的转换

由大地经纬度、垂线偏差求出测站系到发射系的转换系数矩阵,再由转换系数矩阵导出测站系到发射系的转换公式^[4]。

2.3.1 测站系到发射系转换矩阵

转换系数矩阵

$$\mathbf{T}_i = [\mathbf{A}_{0X}]^T [\mathbf{B}_0]^T [\mathbf{L}_0]^T [\mathbf{U}_0]^T \mathbf{B}_i \mathbf{L}_i \mathbf{U}_i, \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos L_i & -\sin L_i \\ 0 & \sin L_i & \cos L_i \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \cos B_i & \sin B_i & 0 \\ -\sin B_i & \cos B_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} 1 & \xi_i & \gamma_i \\ -\xi_i & 1 & -\eta_i \\ -\gamma_i & \eta_i & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.3.2 测站坐标系到发射坐标系转换公式

设目标在测站坐标系中的方位角为 A_i ,俯仰角为 E_i ,测距 R_i ,经过坐标转换后方位角为 A_f ,俯仰角为 E_f ,测距 R_f 。则测站坐标系下目标的方向余弦为

$$\begin{bmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E_i \cos A_i \\ \sin E_i \\ \cos E_i \sin A_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

经过坐标转换后在发射坐标系下的方向余弦为

$$\begin{bmatrix} l_f \\ m_f \\ n_f \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} \cos E_i \cos A_i \\ \sin E_i \\ \cos E_i \sin A_i \end{bmatrix}. \quad (7)$$

目标在发射坐标系下的测距、俯仰角及方位角为

$$R_f = \sqrt{D^2 + R_i^2 - 2R_i H},$$

$$E_f = \arcsin m_f,$$

$$A_f = \begin{cases} \arctan\left(\frac{n_f}{l_f}\right), & n_f \geq 0, \quad l_f \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{n_f}{l_f}\right) + \pi, & l_f < 0 \\ \arctan\left(\frac{n_f}{l_f}\right) + 2\pi, & n_f < 0, \quad l_f \geq 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $H = x_0 l_f + y_0 m_f + z_0 n_f$, $D = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$,

(x_0, y_0, z_0) 为测站站址在发射系的坐标。

3 定位模型

通常,经纬仪的测量信息是目标的方位角 A 和俯仰角 E ,雷达的测量信息是目标的方位角 A 、俯仰角 E 及距离 R 。在经纬仪测量坐标系和雷达测量坐标系中,坐标原点一般为经纬仪三轴中心或无线电测量设备接收天线回转中心,通常用方位角 A 、俯仰角 E 及距离 R 来确定目标的位置^[9]。

3.1 融合定位测量系统

通常可以认为一台经纬仪加上一台雷达构成一个测量联合系统,数学模型的建立如图2所示。模型中以发射点为坐标系原点, X 轴在发射坐标系原点水平面内,过坐标原点指向射击瞄准方向; Y 轴过坐标原点沿铅垂线方向向上为正; Z 轴在发射坐标系原点水平面内,与 X 轴和 Y 轴构成右手直角坐标系^[3,4]。

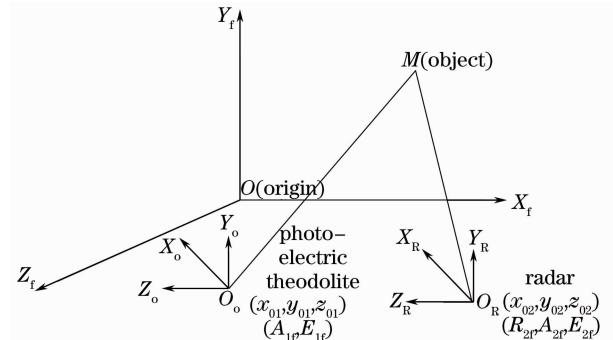


图2 联测系统坐标关系示意图

Fig. 2 Illustration of the coordinate relation of the joint measuring system

3.2 融合定位模型

由于测量体制的不同,经纬仪和雷达的跟踪测量数据之间往往存在采样频率不一致和时间不同步的情况,在建立融合定位模型时,必须先对经纬仪和雷达设备的测量数据进行时间同步修正和采样频率一致修正,通常情况下时间同步修正都以遥测时间零点为基准。

设在某测站放置了一台光电经纬仪和一台雷达设备,它们在发射坐标系中的站址坐标分别为 (x_{01}, y_{01}, z_{01}) 和 (x_{02}, y_{02}, z_{02}) ,经纬仪和雷达设备的测量数据都以遥测时间零点为基准进行了时间同步修正、采样频率一致修正、其他各种系统误差修正且转到发射坐标系中的测量信息分别为 $A_{1i}, E_{1i}, A_{2i}, E_{2i}, R_{2i}$ 。利用全微分公式,根据两设备站址差由经纬仪测角元素计算出雷达测角元素,建立光电经纬

仪-雷达联合定位模型。

z_i , 由经纬仪测角 A_{1i} 、 E_{1i} 求出雷达的测角 A'_{2i} 、 E'_{2i} 。

设目标在发射坐标系中的标准弹道为 x_i, y_i ,

由 $\tan A_{1i} = \frac{(z_i - z_{01})}{(x_i - x_{01})}$, $R_{1i} = \sqrt{(x_i - x_{01})^2 + (y_i - y_{01})^2 + (z_i - z_{01})^2}$ 微分, 得

$$\sec^2 A_{1i} dA = \frac{(x_i - x_{01}) dz_0 - (z_i - z_{01}) dx_0}{(x_i - x_{01})^2},$$

$$dA = \frac{\cos^2 A_{1i}}{x_i - x_{01}} (dz_0 - \tan A_{1i} dx_0) = \frac{\cos^2 A_{1i}}{R_{1i} \cos A_{1i} \cos E_{1i}} (dz_0 - \tan A_{1i} dx_0), \quad (9)$$

则

$$dA = \frac{1}{R_{1i} \cos E_{1i}} (\cos A_{1i} dz_0 - \sin A_{1i} dx_0), \quad A'_{2i} = A_{1i} + dA. \quad (10)$$

由 $\sin E_{1i} = \frac{(y_i - y_{01})}{R_{1i}}$, $R_{1i} = \sqrt{(x_i - x_{01})^2 + (y_i - y_{01})^2 + (z_i - z_{01})^2}$ 微分, 得

$$\cos E_{1i} dE = \frac{\{R_{1i} dy_0 - (y_i - y_{01}) R_{1i}^{-1} [(x_i - x_{01}) dx_0 + (y_i - y_{01}) dy_0 + (z_i - z_{01}) dz_0]\}}{R_{1i}^2}, \quad (11)$$

则

$$dE = \frac{[\sin E_{1i} (\cos A_{1i} dx_0 + \sin A_{1i} dz_0) - \cos E_{1i} dy_0]}{R_{1i}}, \quad E'_{2i} = E_{1i} + dE. \quad (12)$$

根据几何关系, 建立光雷联合定位模型, 计算出目标在发射坐标系的位置参数:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{2i} \cos E'_{12i} \cos A'_{12i} \\ R_{2i} \sin E'_{12i} \\ R_{2i} \cos E'_{12i} \sin A'_{12i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{02} \\ y_{02} \\ z_{02} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 $dx_0 = x_{02} - x_{01}$, $dy_0 = y_{02} - y_{01}$, $dz_0 = z_{02} - z_{01}$ 。

4 精度分析

在模型的各项输入中, 测站站址可由大地测量精确确定, 可以忽略其造成的影响, 主要考虑雷达的测距误差和经纬仪的测角误差对最终结果的影响^[3,9]。由误差传播定律, 测元 R_2, A_1, E_1 的误差传播到测量系下弹道位置坐标上的误差为

$$\Delta x_c = \left(\frac{\partial x}{\partial R_2}\right) \Delta R + \left(\frac{\partial x}{\partial A_1}\right) \Delta A + \left(\frac{\partial x}{\partial E_1}\right) \Delta E = \Delta R \cos A_1 \cos E_1 - \Delta A R_2 \sin A_1 \cos E_1 - \Delta E R_2 \cos A_1 \sin E_1,$$

$$\Delta y_c = \left(\frac{\partial y}{\partial R_2}\right) \Delta R + \left(\frac{\partial y}{\partial A_1}\right) \Delta A + \left(\frac{\partial y}{\partial E_1}\right) \Delta E = \Delta R \sin E_1 + \Delta E R_2 \cos E_1,$$

$$\Delta z_c = \left(\frac{\partial z}{\partial R_2}\right) \Delta R + \left(\frac{\partial z}{\partial A_1}\right) \Delta A + \left(\frac{\partial z}{\partial E_1}\right) \Delta E = \Delta R \sin A_1 \cos E_1 + \Delta A R_2 \cos A_1 \cos E_1 - \Delta E R_2 \sin A_1 \sin E_1, \quad (14)$$

式中 $\Delta R, \Delta A, \Delta E$ 分别为 R_2, A_1, E_1 上的误差, 记 $\sigma_R^2, \sigma_A^2, \sigma_E^2$ 分别为误差的方差。用矩阵表示为

$$\Delta \mathbf{X}_c = \begin{bmatrix} \Delta x_c \\ \Delta y_c \\ \Delta z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A_1 \cos E_1 & -R_2 \sin A_1 \cos E_1 & -R_2 \cos A_1 \sin E_1 \\ \sin E_1 & 0 & R_2 \cos E_1 \\ \sin A_1 \cos E_1 & R_2 \cos A_1 \cos E_1 & -R_2 \sin A_1 \sin E_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta A \\ \Delta E \end{bmatrix}, \quad (15)$$

则测站坐标系下坐标参数的精度

$$\begin{cases} \sigma_{x_c}^2 = (\cos A_1 \cos E_1)^2 \sigma_R^2 + (R_2 \sin A_1 \cos E_1)^2 \sigma_A^2 + (R_2 \cos A_1 \sin E_1)^2 \sigma_E^2 \\ \sigma_{y_c}^2 = (\sin E_1)^2 \sigma_R^2 + (R_2 \cos E_1)^2 \sigma_E^2 \\ \sigma_{z_c}^2 = (\sin A_1 \cos E_1)^2 \sigma_R^2 + (R_2 \cos A_1 \cos E_1)^2 \sigma_A^2 + (R_2 \sin A_1 \sin E_1)^2 \sigma_E^2 \end{cases}. \quad (16)$$

经过简单转换, 即可得到目标坐标在发射坐标系下的精度

$$\sum \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i \begin{bmatrix} \sigma_{xc}^2 \\ \sigma_{yc}^2 \\ \sigma_{zc}^2 \end{bmatrix} \mathbf{T}_i^T, \quad (11)$$

5 实际应用

在某大型试验任务中,跟踪运载火箭的首区某脉冲雷达因多种原因跟踪质量较差,直接影响到弹道测量结果,而此弧段仅有此脉冲雷达和一台 160 光电经纬仪设备同时跟踪测量。为了能得到较高精度的弹道结果,应用上面建立的处理模型来比较分析雷达单台定位精度和光雷联合定位的精度;同时,

表 1 测量信息列表

Table 1 Measurement information list

| Time /s | Azimuth $A_1/(\circ)$ | Elevation $E_1/(\circ)$ | Ranging R_2/m | Azimuth $A_2/(\circ)$ | Elevation $E_2/(\circ)$ |
|---------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 35.000 | 334.38913 | 4.47096 | 44614.97249 | 334.38896 | 4.31850 |
| 40.000 | 334.75680 | 5.96569 | 44537.00304 | 334.71549 | 5.90513 |
| 45.000 | 335.29893 | 7.72519 | 44431.53006 | 335.25727 | 7.70067 |
| 50.000 | 336.06108 | 9.74991 | 44305.23319 | 336.02825 | 9.72751 |
| 55.000 | 337.08850 | 12.03761 | 44160.13015 | 337.05711 | 12.00576 |
| 60.000 | 338.44882 | 14.59799 | 44015.27467 | 338.41731 | 14.56550 |
| 65.000 | 340.21938 | 17.43969 | 43893.80620 | 340.19365 | 17.40909 |
| 70.000 | 342.50794 | 20.55933 | 43836.35012 | 342.49935 | 20.52616 |
| 75.000 | 345.43805 | 23.94190 | 43911.27985 | 345.43255 | 23.91853 |
| 80.000 | 349.14245 | 27.53899 | 44205.95022 | 349.13236 | 27.54592 |
| 85.000 | 353.76089 | 31.26224 | 44829.45533 | 353.74771 | 31.29284 |
| 90.000 | 359.45151 | 34.99145 | 45917.40426 | 359.38877 | 34.99449 |
| 95.000 | 6.19734 | 38.44988 | 47600.44635 | 6.13867 | 38.42966 |
| 100.000 | 14.00509 | 41.41769 | 50029.89754 | 13.96132 | 41.41563 |
| 105.000 | 22.64971 | 43.64529 | 53366.86795 | 22.61568 | 43.62444 |
| 110.000 | 31.69207 | 44.97335 | 57759.10143 | 31.67168 | 44.96206 |
| 115.000 | 40.58799 | 45.38428 | 63325.76524 | 40.57195 | 45.39751 |
| 120.000 | 48.84884 | 44.99822 | 70169.90827 | 48.84322 | 44.99787 |

表 2 弹道比对差统计结果

Table 2 Statistics result of the trajectory comparison error

| Coordinate component | Time period /s | Single positioning and GPS trajectory | | Joint positioning and GPS trajectory | |
|----------------------|----------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|
| | | Mean error /m | Mean square error /m | Mean error /m | Mean square error /m |
| X | 30.0~120.0 | -18.331 | 28.494 | -17.114 | 10.717 |
| Y | 30.0~120.0 | -13.982 | 29.516 | -3.193 | 10.435 |
| Z | 30.0~120.0 | -6.036 | 11.725 | 4.249 | 8.196 |

从图 3~5 中可以看出,雷达单台定位与光雷联合定位结果趋势基本一致,但光雷联合定位结果明显优于单台定位结果;图 6~8 也明显显示,光雷联合定位精度高于单台雷达定位精度。由表 2 的统计结果来看,光雷联合定位结果与高精度 GPS 弹道比

将定位结果与高精度的全球定位系统(GPS)弹道进行作差比对,定量分析其定位精度。

表 1 为此次试验中某时段经纬仪和雷达的测量信息列表,表 1 中 A_1 、 E_1 为 160 经纬仪测量信息, R_2 、 A_2 、 E_2 为脉冲雷达测量信息。表 2 为单台雷达定位和光雷联合定位计算弹道与 GPS 弹道比对差的统计结果。

图 3~5 是用单台雷达定位和光雷联合定位计算的坐标结果,图 6~8 是用单台雷达定位和光雷联合定位计算的坐标精度。

对平均误差和均方误差的绝对值均小于单台雷达定位的比对结果,也就是说光电经纬仪-雷达联合定位结果更接近于高精度 GPS 弹道,精度要高于雷达单台定位精度,更能满足高精度事后数据处理要求。

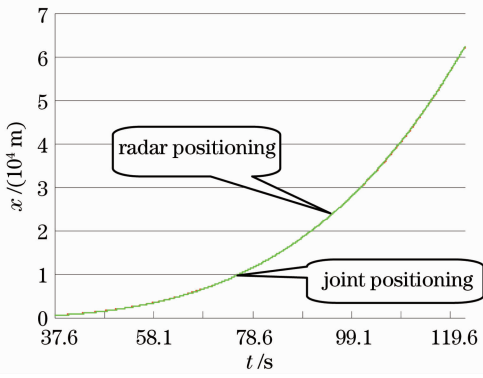


图 3 X 方向位置分量
Fig. 3 Position in direction X

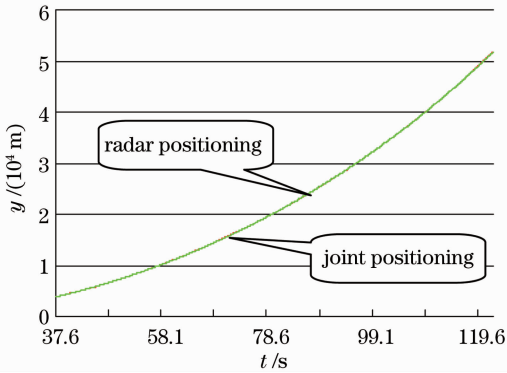


图 4 Y 方向位置分量
Fig. 4 Position in direction Y

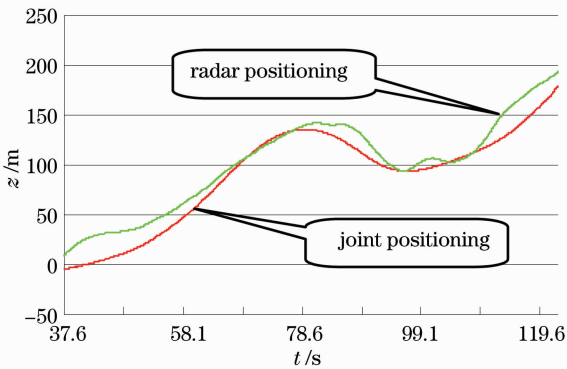


图 5 Z 方向位置分量
Fig. 5 Position in direction Z

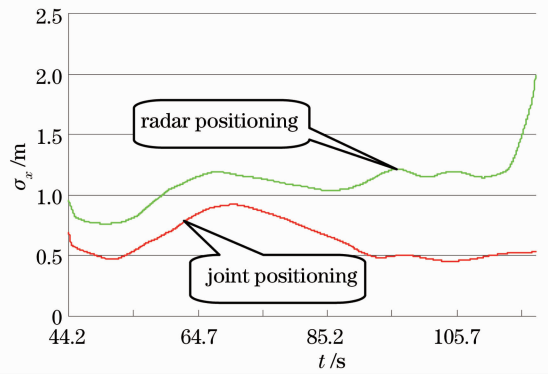


图 6 X 方向定位精度
Fig. 6 Positioning accuracy in direction X

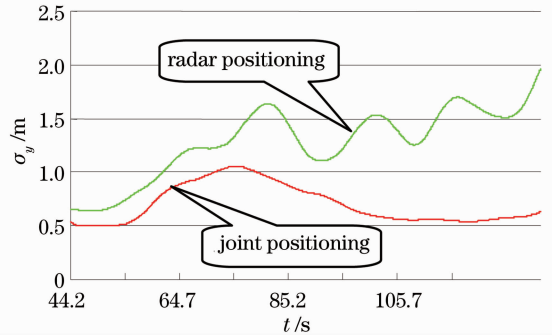


图 7 Y 方向定位精度
Fig. 7 Positioning accuracy in direction Y

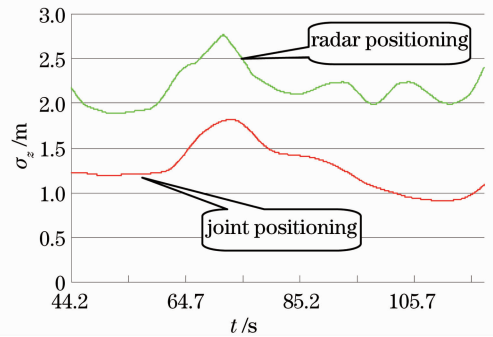


图 8 Z 方向定位精度

Fig. 8 Positioning accuracy in direction Z

应用价值。实验结果证明:光电经纬仪-雷达联合定位精度要高于雷达单台定位精度;定位精度达到 2 m 以内,更能满足高精度事后数据处理要求。

参 考 文 献

- 1 He Zhaocai, Hu Baoan. Optical Measurement System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1~24
何照才, 胡保安. 光电测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1~24
- 2 Liu Lisheng. Tracking Data Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 270~294
刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 270~294
- 3 Jiang Pin, Gao Xiaodong, Wu Qinzhang. Model for joint

6 结 论

从以上分析和实际应用可知,利用光电经纬仪及其附近的雷达,通过本文提出的计算模型融合两者的测角测距信息,可以实现对空中飞行目标的定位。本定位模型充分利用光电经纬仪高精度测角和雷达高精度测距的特点,在靶场试验外弹道处理中可以发挥很好的作用,同时还可推广到同站光测设备之间或雷达设备之间的测角信息融合,具有实际

- positioning of radar and electro-optical theodolite and its errors analysis [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(6): 66~68
- 蒋 平, 高晓东, 吴钦章. 雷达-光电经纬仪联合定位模型及误差分析[J]. 光电工程, 2005, **32**(6): 66~68
- 4 Liu Ling. Study and Analysis for Tracking Post-Task Data Processing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. 28~35
- 刘 令. 弹道数据事后处理分析与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005. 28~35
- 5 Zhang Mitai, Hou Honglu, Quan Guiqin. Research and simulation of distribution of intersection measurement points with multiple photoelectric theodolites [J]. *J. Xi'an Institute of Technology*, 2005, **25**(1): 20~22
- 张密太, 侯宏录, 权贵秦. 光电经纬仪多站交会测量布站方法及仿真[J]. 西安工业大学学报, 2005, **25**(1): 20~22
- 6 Gao Ce, Qiao Yanfeng. Real time error correction method for photoelectrical theodolite [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2007, **15**(6): 846~851
- 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
- 7 Zhao Lirong, Liu Yuhan, Zhu Wei. Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2786~2792
- 赵立荣, 柳玉晗, 朱 玮. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(11): 2786~2792
- 8 Shi Zhangsong, Liu Zhong. Method and Theory of Target Tracking and Data Fusion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 8~12
- 石章松, 刘 忠. 目标跟踪与数据融合理论及方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 8~12
- 9 Hu Shaolin, Xu Aihua, Guo Xiaohong. Technic of Pulse Radar Tracking and Measurement Data Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 168~171
- 胡绍林, 许爱华, 郭小红. 脉冲雷达跟踪测量数据处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 168~171
- 10 Sheng Weidong, Long Yunli, Zhou Yiyu. Analysis of target location space-based optical-sensor network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0228001
- 盛卫东, 龙云利, 周一宇. 天基光学传感器网络目标定位精度分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0228001
- 11 Wan Ming, Zhang Fengming, Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1011001
- 万 明, 张凤鸣, 胡 双. 基于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1011001
- 12 Zhao Jinyu. Error Analysis and Correction Technology for Photoelectricity Telescope [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. 25~59
- 赵金宇. 光电望远镜误差分析及补偿技术[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005. 25~59
- 13 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo *et al.*. A novel method for ladar target orientation estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0414002
- 郭裕兰, 鲁 敏, 谭志国 等. 一种新的激光雷达目标姿态估计算法[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 0414002
- 14 Chen Xiaoping, Ma Junguo, Zhao Hongzhong *et al.*. Target recognition algorithm based on two-dimensional wavelet transform for laser imaging radar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 041001
- 陈晓清, 马君国, 赵宏钟 等. 基于二维小波变换的激光成像雷达目标识别算法[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(4): 041001
- 15 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001
- 姜海娇, 来建成, 王春勇 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0514001

栏目编辑: 何卓铭