

doi: 10.7690/bgzd.2014.01.018

捷联光电设备瞄准线校准技术

丁涛

(洛阳光电设备研究所光电系统部, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对传统光电设备误差较大的问题, 基于捷联式光电设备, 提出了地面静基座校准和空中动态校准 2 种标定方法。地面静基座校准法根据特定位置靶标的观测数据及空间变换关系, 推导了广角光电系统的等效测量关系; 空中动态校准法利用主子惯导传递对准后的姿态阵推导。仿真结果证明: 地面静基座标定方法精度高于空中动态校准方法, 而空中动态校准则计算简单, 校准方便。这 2 种标定方法都适用于平台式光电设备, 可改善其简单标定精度的不足。

关键词: 光电设备; 瞄准线; 校准; 等效测量角

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Aiming Line Calibration Technique of Strapdown Photoelectric Equipment

Ding Tao

(Department of Photoelectric System, Institute of Electro-Optical Equipment of AVIC in Luoyang, Luoyang 471009, China)

Abstract: Aiming at the error of traditional photoelectric equipment, based on strapdown photoelectric equipment, put forwards two calibration methods including ground static base calibration and air dynamic calibration. According to observation data and space transformation relationship of specific position target, ground static base calibration method deduces the equivalent measurement relationship of wide scope devices. The air dynamic calibration deduces by using attitude matrix of host-slave INS transfer after alignment. The simulation results show: ground static base calibration methods is more precise than air dynamic calibration method, but air dynamic calibration method has advantages of easy calculation and calibration. The two calibration methods both can be used in platform photoelectric equipment and they can improve precision of simple calibration.

Keywords: photoelectric equipment; aiming line; calibration; equivalent measurement angle

0 引言

现今飞机越来越多地使用光电观瞄设备^[1-2], 使其瞄准线校准技术成为一项关键技术。光电设备的瞄准线校准就是通过一定方法标定光电设备与载机之间的姿态关系。光电设备通常安装在二轴稳定平台上, 其地面瞄准线校准就是观察飞机正前方靶标, 手动对准标出零位。这种简单方法无法标定出视轴横滚误差, 且方位方向误差较大。

捷联光电设备视场较大, 直接固联安装于载机表面, 无法依靠手动瞄准标出零位; 因此, 笔者采用 2 种方法对捷联光电设备进行瞄准线姿态标定, 并分别进行精度分析。

1 地面静基座瞄准线校准

地面静基座校准原理是寻找适当位置摆放靶标, 用观瞄设备的观测数据将实际安装角标定出来。本节用到的坐标系说明如下:

- 1) 飞机机体系 b_f , 以飞机中心为原点, 右前上方向分别为其 x 、 y 、 z 轴;
- 2) 产品基座系 b , 将飞机机体系 b_f 原点平移

至产品中心, 坐标轴方向不变;

- 3) 实际产品系 a , 以产品中心为原点, 光轴为 y 轴, x 、 z 轴平行于图像焦平面;

- 4) 计算产品系 c , 以产品中心为原点, x 、 y 、 z 轴方向由测量值计算得出, 显然当量测值都无误差时该系与实际安装系 a 重合。

本节所述的安装姿态角是一组连续旋转的欧拉角^[3], 其旋转次序均规定为先绕 z 轴旋转方位, 然后绕 x 轴旋转俯仰, 最后绕 y 轴旋转横滚。具体说明如下:

- 1) 实际安装角, 产品基座系 b 至实际产品系 a 的姿态角, 依次设为 ψ 、 θ 、 γ ;

- 2) 计算安装角, 产品基座系 b 至计算产品系 c 的姿态角, 依次设为 ψ_c 、 θ_c 、 γ_c ;

- 3) 计算误差角, 实际产品系 a 至计算产品系 c 的姿态角, 依次设为 δ_ψ 、 δ_θ 、 δ_γ 。

1.1 光电设备的等效测量角

光电设备给出的量测数据, 是在焦平面上 2 个方向偏离的像素, 是目标在焦平面上投影的坐标,

收稿日期: 2013-08-22; 修回日期: 2013-09-12

作者简介: 丁涛(1981—), 男, 河南人, 回族, 硕士, 工程师, 从事机电控制系统及数据处理系统研究。

没有先后次序。而运动学分析中常将角运动以具有次序性的欧拉角表示,直接用像素坐标代替欧拉角,非小角度时将产生很大误差。因此有必要分析像素坐标^[4]与等效测量角的关系。

如图 1 所示,坐标系 $Oxyz$ 为实际产品系 a 。产品中心轴为 y 轴,焦平面垂直于 y 轴,与焦点 O 距离为 L 。焦平面为一矩形,中心位于 y 轴,四边分别平行于 x 轴或 z 轴。焦平面绕 z 轴为方位视场 fov_{yaw} ,绕 x 轴为俯仰视场 $\text{fov}_{\text{pitch}}$,通常视场角都小于 π 。探测器方位视场总像素数 f_z ,探测器俯仰视场总像素数 f_x 。目标 m 在焦平面上的投影为点 N ,已知其对应的像素坐标为 (f_{mx}, f_{mz}) ,设 N 点坐标为 (x_N, z_N) 。

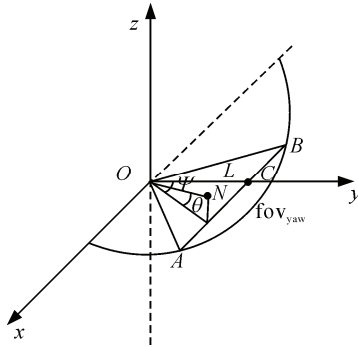


图 1 像平面投影示意图

计算 N 点的 x 轴坐标 x_N 如下:

$$\overline{AC} = \overline{CB} = \overline{OC} \cdot \tan(\text{fov}_{\text{yaw}} / 2) = L \tan(\text{fov}_{\text{yaw}} / 2)$$

$$\text{由于 } \frac{f_{mx}}{f_x} = \frac{x_N}{AB}, \text{ 故 } x_N = \frac{f_{mx}}{f_x} \overline{AB} = 2L \frac{f_{mx}}{f_x} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right);$$

同理,可推出 N 点的 z 轴坐标

$$z_N = 2L \frac{f_{mz}}{f_z} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{pitch}}}{2}\right)$$

又因为 N 点是像平面上的投影,因此 N 点在坐标系 b 中的空间坐标为:

$$\begin{cases} x_N = 2L \frac{f_{mx}}{f_x} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right) \\ y_N = L \\ z_N = 2L \frac{f_{mz}}{f_z} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{pitch}}}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

设焦点至目标 m 的射线是由传感器坐标系 a 先绕 z 轴旋转方位角 ψ_m ,再绕 x 轴旋转俯仰角 θ_m 得到,

$$\psi_m, \theta_m \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right); \text{ 转动后坐标系为目标系 } m.$$

在系 a 中取 y 轴单位向量 \mathbf{OM} , 记为

$\mathbf{R}_M^a = [0, 1, 0]^T$ 。令系 a 作上述 2 次等效旋转,点 M 转动至 M' , \mathbf{OM}' 即焦点至目标的射线。通过坐标变换,可计算 M' 在 a 系中的坐标 $\mathbf{R}_{M'}^a$:

$$\mathbf{R}_{M'}^a = \mathbf{C}_m^a \mathbf{R}_M^a = \begin{bmatrix} -\sin\psi_m \cos\theta_m \\ \cos\psi_m \cos\theta_m \\ \sin\theta_m \end{bmatrix}$$

因此可得到 \mathbf{OM}' 在系 a 中的空间直线方程:

$$\frac{z}{\sin\theta_m} = \frac{y}{\cos\psi_m \cos\theta_m} = \frac{x}{-\sin\psi_m \cos\theta_m}$$

因为 N 点是射线 \mathbf{OM}' 与焦平面的交点,因此:

$$\begin{cases} x_N = -y_N \tan\psi_m \\ y_N = L \\ z_N = y_N \frac{\tan\theta_m}{\cos\psi_m} \end{cases} \quad (2)$$

将式 (2) 与式 (1) 比较,可得等效测量角:

$$\begin{cases} \psi_m = \arctan\left[-\frac{2f_{mx}}{f_x} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right)\right] \\ \theta_m = \arctan\left[\frac{\frac{2f_{mz}}{f_z} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{pitch}}}{2}\right)}{\sqrt{4\frac{f_{mx}^2}{f_x^2} \tan^2\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right) + 1}}\right] \end{cases} \quad (3)$$

继续分析,当视场 fov_{yaw} 、 $\text{fov}_{\text{pitch}}$ 是小角度且方位像素 f_{mz} 很小时,式 (3) 可近似为:

$$\begin{cases} \psi_m = -\frac{f_{mx}}{f_x} \text{fov}_{\text{yaw}} \\ \theta_m = \frac{f_{mz}}{f_z} \text{fov}_{\text{pitch}} \end{cases}$$

这便是工程中常用的简化式及其应用条件。

比较式 (1)、式 (2) 亦可得:

$$\begin{cases} f_{mx} = -\frac{f_x \tan\psi_m}{2 \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right)} \\ f_{mz} = \frac{f_z \tan\theta_m}{2 \cos\psi_m \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{pitch}}}{2}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 在误差分析中将使用到。

1.2 地面静基座校准方法推导

观瞄设备安装时,均已知其理想安装姿态,故笔者以设备安装于飞机前向为例推导。此时姿态角在 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 范围内,应将校准靶置于飞机前向。若观瞄设备安装位置无法看到飞机前后向,则可将靶标放于飞机左右向,推导原理与前后向一致。

该方法在机场停机坪进行校准，应首先将飞机调整为水平状态，标出机轴线；然后作出以产品为中心，平行于机轴的产品前向轴线，并测出产品至停机坪地面的高度。

上述操作完成后，就相当于将机体系 b_f 平移到了以产品中心为原点的产品基座系 b 。这里采用两点量测的方法对产品姿态进行计算，具体分析如下：

第 1 点记为 A 点，将靶标放在在产品前向轴线上，距离 L_A 大于 50 m，高度调整到与产品等高，即高度 $h_A = 0$ 。启动设备观察靶标，可得到 A 点的像素坐标 (f_{Ax}, f_{Az}) ，根据式 (3) 可将其转化为等效欧拉角为 ψ_A, θ_A 。

第 2 点记为 B 点，将靶标放在在产品前向轴线上，距离 L_B 大于 50 m，且 $L_B = L_A$ ；高度调整到与产品不等高 $h_B > 0$ 。启动设备观察靶标，可得到 B 点的像素坐标 (f_{Bx}, f_{Bz}) ，根据式 (3) 可将其转化为等效欧拉角为 ψ_B, θ_B 。

如图 2 所示， A 点在系 b 中的坐标为 r_A^b ， $r_A^b = [0, L_A, h_A]^T$ ； B 点在系 b 中的坐标为 r_B^b ， $r_B^b = [0, L_B, h_B]^T$ 。

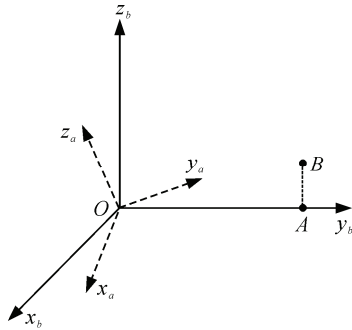


图 2 靶标摆放示意图

下面计算观瞄设备观察角与测量点坐标间的关系，以点 A 为例计算如下：

令 $r_A^b = [r_{Ax}^b, r_{Ay}^b, r_{Az}^b]^T$ ，模为 $\|r_A^b\|$ 。

系 b 至系 a 的姿态角为欧拉角 ψ, θ, γ ，因此：

$$C_b^a = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \theta \sin \psi & \cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \sin \theta \cos \psi & -\sin \gamma \cos \theta \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \theta \sin \psi & \sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \sin \theta \cos \psi & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了计算方便，令 $C_b^a = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$ ；

显然，可得 A 点在系 a 中的坐标 r_A^a ：

$$r_A^a = C_b^a r_A^b = \begin{bmatrix} C_{11} r_{Ax}^b + C_{12} r_{Ay}^b + C_{13} r_{Az}^b \\ C_{21} r_{Ax}^b + C_{22} r_{Ay}^b + C_{23} r_{Az}^b \\ C_{31} r_{Ax}^b + C_{32} r_{Ay}^b + C_{33} r_{Az}^b \end{bmatrix} \quad (6)$$

启动观瞄设备观察 A 点，设系 a 经过等效欧拉角 ψ_A, θ_A 旋转后得到系 a_A 。易知 A 点位于系 a_A 的 y 轴上，坐标为 $r_A^{a_A} = [0, \sqrt{L_A^2 + h_A^2}, 0]^T$ 。

系 a 至系 a_A 的坐标变换矩阵 $C_a^{a_A}$ 为

$$C_a^{a_A} = \begin{bmatrix} \cos \psi_A & \sin \psi_A & 0 \\ -\cos \theta_A \sin \psi_A & \cos \theta_A \cos \psi_A & \sin \theta_A \\ \sin \theta_A \sin \psi_A & -\sin \theta_A \cos \psi_A & \cos \theta_A \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{令 } C_a^{a_A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}。$$

显然可得：

$$r_A^a = (C_a^{a_A})^T r_A^{a_A} = \begin{bmatrix} A_{21} \|r_A^b\| \\ A_{22} \|r_A^b\| \\ A_{23} \|r_A^b\| \end{bmatrix} \quad (8)$$

比较式 (6) 与式 (8) 可得

$$\begin{cases} A_{21} \|r_A^b\| = C_{11} r_{Ax}^b + C_{12} r_{Ay}^b + C_{13} r_{Az}^b \\ A_{22} \|r_A^b\| = C_{21} r_{Ax}^b + C_{22} r_{Ay}^b + C_{23} r_{Az}^b \\ A_{23} \|r_A^b\| = C_{31} r_{Ax}^b + C_{32} r_{Ay}^b + C_{33} r_{Az}^b \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 结合式 (7) 则可推出：

$$\begin{cases} \theta_A = \arcsin \left(\frac{C_{31} r_{Ax}^b + C_{32} r_{Ay}^b + C_{33} r_{Az}^b}{\|r_A^b\|} \right) \\ \psi_A = \arctan \left(-\frac{C_{11} r_{Ax}^b + C_{12} r_{Ay}^b + C_{13} r_{Az}^b}{C_{21} r_{Ax}^b + C_{22} r_{Ay}^b + C_{23} r_{Az}^b} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 在后面的误差分析中使用。

类似于上述过程，分析 B 点。同样设系 a 经过等效欧拉角 ψ_B, θ_B 旋转后得到系 a_B ， B 点在系 a_B 中的坐标为 $r_B^{a_B} = [0, \sqrt{L_B^2 + h_B^2}, 0]^T$ 。

$$\text{令 } C_a^{a_B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

显然对于 B 点也有类似于式 (9) 的关系。

依照式 (9)，再带入且有已知条件 $L_B = L_A, h_A = 0$ ，则可得：

$$\begin{cases} C_{13} = \frac{B_{21}\sqrt{L_A^2 + h_B^2} - A_{21}L_A}{h_B} \\ C_{23} = \frac{B_{22}\sqrt{L_A^2 + h_B^2} - A_{22}L_A}{h_B} \\ C_{33} = \frac{B_{23}\sqrt{L_A^2 + h_B^2} - A_{23}L_A}{h_B} \\ C_{12} = A_{21} \\ C_{22} = A_{22} \\ C_{32} = A_{23} \end{cases} \quad (11)$$

由于测量误差存在, 将造成:

$$\begin{cases} C_{13}^2 + C_{23}^2 + C_{33}^2 = \alpha^2 \neq 1 \\ (C_{12}C_{33} - C_{13}C_{32})^2 + C_{22}^2 + C_{23}^2 = \beta^2 \neq 1 \end{cases} \quad (12)$$

为提高计算精度, 将式 (11) 部分归一化为:

$$\begin{cases} \bar{C}_{13} = C_{13}/\alpha \\ \bar{C}_{23} = C_{23}/\alpha \\ \bar{C}_{33} = C_{33}/\alpha \\ \bar{C}_{12} = \alpha C_{12}/\beta \\ \bar{C}_{32} = \alpha C_{32}/\beta \end{cases} \quad (13)$$

已知 $\psi, \theta, \gamma \in (-90^\circ, 90^\circ)$, 观察式 (5) 可得:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(\bar{C}_{23}) \\ \gamma = \arctan\left(-\frac{\bar{C}_{13}}{\bar{C}_{33}}\right) \\ \psi = \arcsin\left(\frac{\bar{C}_{12}\bar{C}_{33} - \bar{C}_{13}\bar{C}_{32}}{\sqrt{1 - \bar{C}_{23}^2}}\right) \end{cases} \quad (14)$$

因此结合式 (11) ~ 式 (14) 即可得出安装角。

1.3 地面静基座校准误差分析

设实际安装角 ψ, θ, γ , 理想测量点 A, B 坐标为 $\mathbf{r}_A^b = [0, L_A, 0]^T$ 和 $\mathbf{r}_B^b = [0, L_A, h_B]^T$; 实测时测量点摆放位置有误差, 设含误差的测量点分别用 A' 和 B' 表示, A' 点坐标为 $\mathbf{r}_{A'}^b = [\delta_x, L_A + \delta_y, \delta_{h1}]^T$; 由于 B' 点是 A' 点直接升高而来, 故其水平误差相同, 高度仅相差刻度误差, B' 点坐标为 $\mathbf{r}_{B'}^b = [\delta_x, L_A + \delta_y, h_B + \delta_{h2}]^T$, $\delta_{h2} = \delta_{h1} + \delta_h$, 其中 $\delta_h \leq 0.001 \text{ m}$ 。

误差分析流程是计算设备观察点 A' 和 B' 的像素坐标, 叠加上像素误差后, 再按照 1.2、1.3 流程算出计算安装角, 然后与理想安装角作比较。

类似于式 (10) 的关系, 可推出实际测量点 A', B' 的等效观测欧拉角与传感器理想姿态、测量点坐标间的关系式, 即有:

$$\begin{cases} \theta_{A'} = \arcsin\left(\frac{C_{31}\delta_x + C_{32}(L_A + \delta_y) + C_{33}\delta_{h1}}{\sqrt{\delta_x^2 + (L_A + \delta_y)^2 + \delta_{h1}^2}}\right) \\ \psi_{A'} = \arctan\left(-\frac{C_{11}\delta_x + C_{12}(L_A + \delta_y) + C_{13}\delta_{h1}}{C_{21}\delta_x + C_{22}(L_A + \delta_y) + C_{23}\delta_{h1}}\right) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \theta_{B'} = \arcsin\left(\frac{C_{31}\delta_x + C_{32}(L_A + \delta_y) + C_{33}(h_B + \delta_{h2})}{\sqrt{\delta_x^2 + (L_A + \delta_y)^2 + (h_B + \delta_{h2})^2}}\right) \\ \psi_{B'} = \arctan\left(-\frac{C_{11}\delta_x + C_{12}(L_A + \delta_y) + C_{13}(h_B + \delta_{h2})}{C_{21}\delta_x + C_{22}(L_A + \delta_y) + C_{23}(h_B + \delta_{h2})}\right) \end{cases} \quad (16)$$

类似于式 (4) 可计算点 A' 和 B' 的像素坐标:

$$\begin{cases} f_{A'x} = -\frac{f_x \tan \psi_{A'}}{2 \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right)} \\ f_{A'z} = \frac{f_z \tan \theta_{A'}}{2 \cos \psi_{A'} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{pitch}}}{2}\right)} \end{cases} \quad \begin{cases} f_{B'x} = -\frac{f_x \tan \psi_{B'}}{2 \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{yaw}}}{2}\right)} \\ f_{B'z} = \frac{f_z \tan \theta_{B'}}{2 \cos \psi_{B'} \tan\left(\frac{\text{fov}_{\text{pitch}}}{2}\right)} \end{cases}$$

将测量点 A' 和 B' 的像素坐标加上图像误差再带入 1.2 及 1.3 节中叙述的安装角解算流程, 就可以解算出含误差的安装角, 即计算安装角 $\psi_c, \theta_c, \gamma_c$ 。

由坐标变换理论知: $\mathbf{C}_a^c = \mathbf{C}_b^c \mathbf{C}_a^b = \mathbf{C}_b^c (\mathbf{C}_a^b)^T$ 。

其中: \mathbf{C}_b^c 由计算安装角 $\psi_c, \theta_c, \gamma_c$ 确定; \mathbf{C}_a^b 由实际安装角 ψ, θ, γ 确定。

而 \mathbf{C}_a^c 由计算误差角 $\delta_\psi, \delta_\theta, \delta_\gamma$ 确定。

$$\text{令 } \mathbf{C}_a^c = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}$$

类似于式 (5), 可得:

$$\begin{cases} \delta_\psi = \arctan\left(-\frac{D_{21}}{D_{22}}\right) \\ \delta_\theta = \arcsin(D_{23}) \\ \delta_\gamma = \arctan\left(-\frac{D_{13}}{D_{33}}\right) \end{cases} \quad (17)$$

由式 (17) 即可计算出计算误差角。

根据旋转矢量理论, 计算误差角可由 1 个旋转矢量表示, 利用四元数计算公式可知等效旋转综合误差为:

$$\Delta = \arccos\left(\sqrt{1 + D_{11} + D_{22} + D_{33}} / 2\right) \quad (18)$$

1.4 地面静基座对准误差仿真

仿真条件: 图像探测器为视场为 $90^\circ \times 90^\circ$, 像元为 512×512 (单位: 像素); 实际安装角 $\psi = 30^\circ, \theta = 20^\circ, \gamma = 10^\circ$ 。

不可控参数：靶标水平误差 $\delta_x, \delta_y \leq 0.1 \text{ m}$ ，高度基准误差 $\delta_{h1} \leq 0.1 \text{ m}$ 。

可控参数：图像测观测误差为 df ；靶标理想前向距离 L ， AB 点高度差 H ，靶标高度刻度误差 δ_h 。

仿真计算结果：等效旋转综合误差 Δ ，经归一化处理的等效旋转综合误差 $\bar{\Delta}$ 。

地面对准误差仿真数据见表 1。

表 1 地面对准误差仿真

序号	df/像素	L/m	H/m	δ_h/mm	Δ/mrad	$\bar{\Delta}/\text{mrad}$
1	1.0	50	1	<5	7.37	6.77
2	1.0	50	1	<1	5.92	5.81
3	0.5	50	1	<1	4.38	4.23
4	0.5	100	1	<1	3.13	3.02
5	0.5	100	2	<1	2.96	2.91
6	0.5	100	3	<1	2.91	2.88

由仿真结果可看出：径向距离、像素误差及靶标高度刻度误差对最终对准精度影响比较大；高差小于 2 m 前影响较大，大于 2 m 后影响不大。另外很明显地可以看出，进行归一化处理的精度有明显提升。通过本次仿真可以得到结论：靶标水平摆放误差及高度基准误差 0.1 m 内，探测器测角精度亚像素级、距离 100 m 以上、测试点高差 2 m 以上、靶标高度刻度误差 1 mm 内，则可以使测角综合精度优于 3 mrad。

2 空中动态瞄准线校准简析

空中动态校准原理是在观瞄设备上固联安装一 IMU 子惯导系统，利用传递对准方法^[5]得到精确的观瞄设备相对于地理系的姿态角，然后与飞机姿态作比较得到观瞄设备的安装姿态角。下面对该方法具体推导，并进行误差分析。

定义地理系 g 是以飞机中心为原点，当地东北天向为其 x 、 y 、 z 轴；定义 IMU 安装系为系 a_i ，该坐标系理想情况下与实际产品系 a 重合。根据 1.1 坐标系定义，地理系 g 至飞机机体系 b_f 的变化矩阵就是飞机姿态阵，记为 $C_g^{b_f}$ ；地理系 g 至实际产品系 a 的变化矩阵就是产品姿态阵，记为 C_g^a 。

飞机姿态阵 $C_g^{b_f}$ 可由机载主惯导系统给出，产品姿态阵 C_g^a 可由 IMU 系统给出。因此可算出产品的安装姿态阵为 $C_{b_f}^a$ 。又因为在进行角度分析时，系 b 等效于系 b_f ，故

$$C_b^a = C_{b_f}^a = C_g^a (C_g^{b_f})^T \quad (19)$$

根据式 (19)、式 (14) 即可计算出产品安装角。设 IMU 安装坐标系为 a_1 ，IMU 姿态计算系为 a_2 ，则误差关系分析

$$C_b^a = C_{b_f}^a = C_{a_1}^a C_{a_2}^{a_1} C_g^{a_2} (C_g^{b_f})^T$$

$C_{a_2}^{a_1}$ 由 IMU 对主惯导的相对误差确定， $C_{a_1}^a$ 由 IMU 安装误差确定。

经半实物仿真试验，可得 IMU 传递对准后对主惯导的相对精度，仿真数据见表 2，置信度均为 1σ 。

表 2 传递对准精度半实物仿真

陀螺精度/ ($^{\circ}$)/h	加表精度(g)	IMU 航向精度/ ($^{\circ}$)	IMU 水平精度/ ($^{\circ}$)
0.05	5×10^{-4}	13	20
0.05	1×10^{-4}	8	12
0.05	5×10^{-5}	3	5
0.50	5×10^{-5}	3	5
1.00	5×10^{-5}	3	5

由试验数据可以看出，IMU 对准精度主要受加表影响。因此 IMU 器件可选择精度为 $1(^{\circ})/\text{h}$ 的陀螺和 $0.05 \times 10^{-5} \text{ g}$ 的加计，可使水平姿态误差小于 $3'$ ，航向精度小于 $5'$ 。

在结构安装时，IMU 安装误差一般不超过 $1'$ 。

综合误差阵为 $C_{a_2}^a = C_{a_1}^a C_{a_2}^{a_1}$ ，利用式 (18) 即可计算出观瞄设备的等效旋转综合误差为 $1.70 \text{ mrad}(1\sigma)$ 。依置信度公式，结果亦为 $5.10 \text{ mrad}(3\sigma)$ 。

3 结论

由推导过程可以看出：空中校准算法较简短，在试飞时可直接标定；地面校准过程比较复杂，需要在靶场摆放靶标且辅助测量。由仿真结果可看出，地面校准精度优于 3 mrad，能够更好地满足其他算法的需求。而笔者所述的瞄准线校准方法不但能够应用在捷联光电设备中，还能够提高平台式光电设备对准精度的不足，实用性较强。

参考文献：

- [1] 陈健，于洪君. 光电对抗与军用光电技术研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 12-17.
- [2] 李晶，朱斌，郭立新，等. 改进的卡尔曼滤波非均匀性校正算法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 58-61.
- [3] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京：科学出版社，2006: 95-202.
- [4] 宋严严，王科伟，等. 光电系统光轴平行性检测方法研究[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 802-805.
- [5] 夏家和，秦永元，游金川. 传递对准精度离线评估方法研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(2): 215-218.