

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.016

跟踪雷达精度检飞试验标准值修正方法

史慧敏¹, 史海龙¹, 张宇飞¹, 王晶晶²

(1. 中国人民解放军 63863 部队, 吉林 白城 137001; 2. 中国人民解放军 63856 部队, 吉林 白城 137001)

摘要: 为了分离炮瞄雷达跟踪精度检飞试验中出现的体效应误差, 提出一种采用 GPS 和光电经纬仪的标准值数据修正方法。分析了跟踪雷达精度检飞试验中测角精度统计误差产生的原因, 介绍了 GPS 数据的修正方法, 详细给出以光电经纬仪为标准设备的系统误差、随机误差统计的数据处理方案, 并以某型雷达精度检飞为实例, 对 2 条检飞航路的一次差进行处理得到对标准值数据修正结果。分析结果证明: 该 2 种方法可以在跟踪雷达精度检飞试验数据处理中有效消除体效应误差, 从而提高被试雷达精度统计结果的准确度。

关键词: 测角精度; 随机误差; 系统误差**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

Standard Coordinate Amending Method in Accuracy Evaluation Flying Test of Tracing Radar

Shi Huimin¹, Shi Hailong¹, Zhang Yufei¹, Wang Jingjing²

(1. No. 63863 Unit of PLA, Baicheng 137001, China; 2. No. 63856 Unit of PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract: In order to separating the effect error by target measurement in precision evaluating flying test, the amending methods of standard coordinate data acquired by GPS and photoelectric theodolite are presented. The main cause of statistical error of angle measuring precision of tracing radar is analyzed. The amending method of GPS data is introduced. Details are given to the data processing scheme of system error and random error statistics taking the photoelectric theodolite as standard equipment. The data amending result is acquired during the difference treatment of two air routes offering the flying test of certain radar as an example. The effectiveness of the two above-named methods in the effect error eliminating by target measurement and the accuracy improving of precision statistic of tracing radar are testified.

Key words: angle measuring precision; random error; systematic error

0 引言

在炮瞄雷达跟踪精度检飞试验中, 标准值测量设备(以下简称标准设备)与被试雷达(以下简称雷达)同步测量目标坐标值。目标机一般为飞机或靶机, 飞行中雷达电磁波的散射中心与标准设备观测中心点可能处于目标体上的不同位置, 若相距较远, 则会在雷达实测值与标准值偏差的基础上引入额外测量误差^[2]。由雷达和标准设备跟踪判读中心位置的差异而引入的额外误差可称为体效应误差, 在统计被试雷达跟踪精度之前需要将它分离出来, 以保证精度统计结果的准确性。在跟踪精度检飞试验中一般采用 GPS 和光电经纬仪作为标准设备, 基于此, 笔者分别介绍这 2 种情况下标准值数据的修正方法。

1 以 GPS 为标准设备的数据修正

全球定位系统(GPS)在炮瞄雷达动态性能检飞

试验中是首选标准值测量设备。虽然 GPS 的定位精度能够满足被试雷达精度指标考核的要求, 但当存在体效应问题时, 雷达跟踪精度统计结果的准确性就会受到影响。

在某型雷达精度检飞试验中, 目标机为 S-200 靶机。检飞前, 将雷达反射截面积符合战技指标要求的反射体安装在目标机机头, 而 GPS 天线则安装在机身中上部某位置。被试雷达的测角精度较高, 小于 1 mil, GPS 天线和反射体安装位置之间存在的间距给被试雷达精度统计带来了体效应误差。下面给出 GPS 数据的修正方法。

图 1 为靶机示意图, 从俯视图可看出 GPS 的安装位置偏于机身一侧。图中 G 点表示 GPS 天线, H 点表示反射体。直角坐标系 $O_b x_b y_b z_b$ 以 GPS 为中心, x_b 轴指向机头且与靶机中轴平行; y_b 轴指向上方, x_b 、 z_b 与 y_b 轴呈右手系, 反射体在坐标系 $O_b x_b y_b z_b$ 中的坐标为 $(l, -h, d)$ 。

收稿日期: 2013-04-13; 修回日期: 2013-05-17

作者简介: 史慧敏(1971—), 女, 山东人, 硕士, 高级工程师, 从事火控系统试验研究。

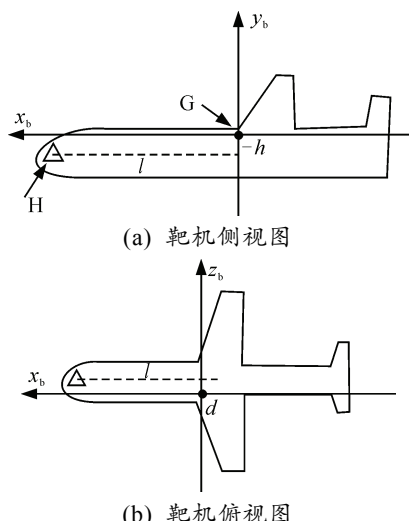


图 1 靶机示意图

图 2 为被试雷达站心坐标系下的飞行航线俯视图，其中 O 点为被试雷达站心，带箭头的线段 L 为航线俯视图。坐标系 $Oxyz$ 为以雷达站为原点的直角坐标系， y 轴指向上方， x 、 z 与 y 轴呈右手系。 θ 为 x 轴到 x_b 轴的角度值。

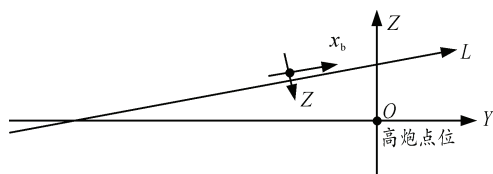


图 2 被试雷达站心坐标系下的飞行航线俯视图

假设未修正前靶机坐标为 (x_b, y_b, z_b) ，修正后坐标为 (x'_b, y'_b, z'_b) ，修正公式为

$$x'_b = x_b + l \cdot \cos \theta - d \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$y'_b = y_b - h \quad (2)$$

$$z'_b = z_b + l \cdot \sin \theta + d \cdot \cos \theta \quad (3)$$

由于目标机一般等高飞行，所以角度 θ 相当于目标航迹当前时刻的切线方向与 x 轴的夹角。

2 光电经纬仪数据的修正

采用光电经纬仪为标准设备时，图像中靶机与背景对比度较弱，为了满足光电经纬仪判读的需要，试前要靶机机腹加装曳光管，靶机进入预定航路后点燃。因无法确定曳光管尾焰的实际长短、光电经纬仪在尾焰判读的具体位置，从而就无法采用 GPS 数据修正的方法对光电经纬仪数据进行修正；因此，必须研究针对光电经纬仪作为标准值设备情况下数据修正方法。

检飞试验采用双向进入双向飞行，航线如图 3。

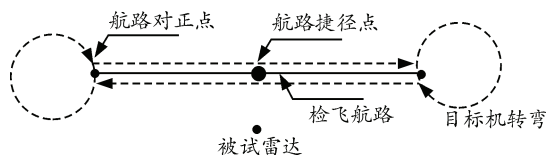


图 3 双向进入航路示意图

图 3 中，实线上下 2 条带有方向箭头的虚线是为了表明 3 个飞行方向，实际是重合于中央的实线。下面给出被试雷达测角系统误差、随机误差统计的数据处理方案。

1) 随机误差统计。

假设被试雷达测得的高低角为

$$\beta_{xi} = \beta_i^0 + s_x + \sigma_{xi} \quad (4)$$

其中： β_i^0 为第 i 个采样时刻的高低角真值； s_x 、 σ_{xi} 分别为被试雷达高低角系统误差和随机误差。

光测设备测得的高低角为

$$\beta_{yi} = \beta_i^0 + s_y + \sigma_{yi} + \Delta \eta_i \quad (5)$$

其中： s_y 、 σ_{yi} 分别为光测设备系统误差和随机误差； $\Delta \eta_i$ 为由于光测设备与被试雷达的判读点不一致造成的测角偏差，它随着靶机距离的变化而变化。

假设有 k 个有效航次， k 为偶数，且航路参数、靶机飞行参数都十分相近。首先用下式求出被试雷达各航次航前的高低角测量一次差^[4]

$$\Delta \beta_i = \beta_{xi} - \beta_{yi} = s_x - s_y + \sigma_{xi} - \sigma_{yi} - \Delta \eta_i \quad (6)$$

再将 k 个有效航次分为 $k/2$ 个小组，每组 2 个航次，用下式求各组 2 个航次临近飞行航段的高低角一次差之差

$$\varphi_i = \Delta \beta_i^1 - \Delta \beta_i^2 =$$

$$s_x^1 - s_x^2 - (s_y^1 - s_y^2) + \sigma_{xi}^1 - \sigma_{xi}^2 - (\sigma_{yi}^1 - \sigma_{yi}^2) - (\Delta \eta_i^1 - \Delta \eta_i^2) \quad (7)$$

式中， $\Delta \beta_i^1$ 和 $\Delta \beta_i^2$ 分别是 2 个航次的测角一次差，且对应的目标机斜距离相等。这里的系统误差是被试雷达和光测设备的固有参数，在式 (7) 中有

$$s_x^1 - s_x^2 = 0 \text{ 和 } s_y^1 - s_y^2 = 0$$

由于 $\Delta \eta_i^1$ 和 $\Delta \eta_i^2$ 是随着目标斜距离的变化而发生变化的，故对应相同的斜距离它们近似相等，有

$$\Delta \eta_i^1 - \Delta \eta_i^2 \approx 0$$

因式 (5) 中标准设备的随机误差 σ_{yi} 可以忽略不计。这样式 (7) 就可以简化为

$$\phi_i = \sigma_{xi}^1 - \sigma_{xi}^2 \quad (8)$$

这里，数据采样时间间隔大于被试雷达最小数据不相关时间。下面将各组的 ϕ_i 合并为一个样本集，假设共 n 个子样，由它们求出样本均方差，即

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi})^2} \quad (9)$$

其中, $\bar{\phi} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \phi_i = 0$ 。

由式 (8), 2 个相互独立随机变量之差的方差为它们各自的方差之和, 有

$$\sigma_{\phi}^2 = 2\sigma_x^2 \quad (10)$$

进而可以求出

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_{\phi} \quad (11)$$

即 σ_x 为被试雷达随机误差的样本估计值。

方位角测量随机误差的统计方法同高低角测量随机误差的统计。

2) 系统误差统计。

① 方位角系统误差的统计。

定义图 3 中从左向右为正向临近航路, 从右向左为反向临近航路。这里假设正反 2 个方向的临近航路的方位角一次差分别为 $\Delta\beta_i^z$ 和 $\Delta\beta_i^f$:

$$\Delta\beta_i^z = \beta_{xi}^z - \beta_{yi}^z = s_x + \sigma_{xi}^z - \Delta\eta_i^z \quad (12)$$

$$\Delta\beta_i^f = \beta_{xi}^f - \beta_{yi}^f = s_x + \sigma_{xi}^f - \Delta\eta_i^f \quad (13)$$

对于航向相对的临近飞行航路, 在距离相同的采样点上 $\Delta\eta_i$ 值大小相等, 但正负号相反。对所有有效正反临近航路的方位角一次差求和, 有

$$\sum_{i=1}^n (\Delta\beta_i^z + \Delta\beta_i^f) = 2n \cdot s_x + \sum_{i=1}^n (\sigma_{xi}^z + \sigma_{xi}^f) - \sum_{i=1}^n (\Delta\eta_i^z + \Delta\eta_i^f) \quad (14)$$

又

$$\Delta\eta_i^z + \Delta\eta_i^f \approx 0 \quad (15)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\sum_{i=1}^n (\sigma_{xi}^z + \sigma_{xi}^f) = 0 \quad (16)$$

因此可以推出

$$\sum_{i=1}^n (\Delta\beta_i^z + \Delta\beta_i^f) = 2n \cdot s_x \quad (17)$$

进而可以推得方位角系统误差的估计值为

$$s_x = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\Delta\beta_i^z + \Delta\beta_i^f) \quad (18)$$

② 高低角系统误差的统计。

由光电经纬仪与雷达的判读点位置偏差造成的方位角体效应误差 $\Delta\eta_i$, 在整个双向进入双向飞行航路上始终为负值, 且距离越近, 其绝对值越大。因此, 方位角系统误差统计的方法不适用于高低角系统误差的统计。但在求出被试雷达方位角系统误差这个固有参数后, 可推算出光电经纬仪判读点与

雷达判读点间距的近似值, 从而按照 GPS 数据修正的方法对光电经纬仪的数据进行修正。

图 4 为目标体效应引起方位角精度评定误差的示意图。该图为检飞航路水平投影, D_j 为航路捷径, 目标机沿航线 L 向被试雷达临近飞行。假设在某一时刻被试雷达跟踪点为 A 点, 光电经纬仪判读点为 B 点, A 和 B 两点距离为 Δl 。被试雷达和经纬仪实测的水平距离分别为 D_A 和 D_B 。

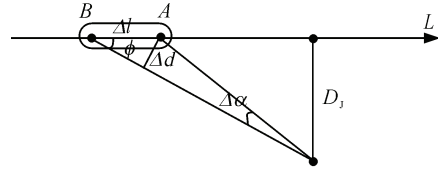


图 4 目标体效应引起方位角精度评定误差的示意

图 4 中

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta d}{D_A} \text{ (rad)} \quad (19)$$

$$\Delta d = \Delta l \cdot \sin\phi \quad (20)$$

$$\sin\phi = \frac{D_j}{D_B} \quad (21)$$

由式 (19) ~ 式 (21) 有:

$$\Delta l = \frac{\Delta\alpha \cdot D_A \cdot D_B}{D_j} \quad (22)$$

$\Delta\alpha$ 单位为弧度。当目标距离小于 500 m, 航路捷径为 200 m 时, 当 Δl 达到 0.5 m 时, $\Delta\alpha$ 可达到 0.4~0.5 mil; 当 Δl 达到 1 m 时, 则 $\Delta\alpha$ 将近 1 mil。

假设共有 k 个有效航路, 用方位角一次差数据减去方位角系统误差, 第 j 个双向进入航路第 i 个采样点的结果为

$$\Delta\beta_{ij}^z = \Delta\beta_{ij}^z - s_x = \sigma_{xj}^z - \Delta\eta_{ij}^z \quad (23)$$

$$\Delta\beta_{ij}^f = \Delta\beta_{ij}^f - s_x = \sigma_{xj}^f - \Delta\eta_{ij}^f \quad (24)$$

将式 (23)、式 (24) 分别代入式 (22), 有

$$\Delta l_{ij}^z = \frac{\Delta\beta_{ij}^z \cdot D_{A_j}^z \cdot D_{B_j}^z}{D_j} \quad (25)$$

$$\Delta l_{ij}^f = \frac{\Delta\beta_{ij}^f \cdot D_{A_j}^f \cdot D_{B_j}^f}{D_j} \quad (26)$$

式中, $D_{A_j}^z$ 、 $D_{B_j}^z$ 、 $D_{A_j}^f$ 、 $D_{B_j}^f$ 分别为第 j 个双向航路第 i 个采样点被试雷达、光电经纬仪实测的目标水平距离。用式 (27) 求光电经纬仪判读点距雷达判读点的距离平均值

$$\Delta l_i = \frac{1}{2k} \left| \sum_{j=1}^k \Delta l_{ij}^z \right| + \frac{1}{2k} \left| \sum_{j=1}^k \Delta l_{ij}^f \right| \quad (27)$$

将 $\Delta\beta'_{ij}$ 和 Δl_{ij} 的表达式代入式 (27), 各双向进入航路第 i 个采样点的水平距离 D_A 、 D_B 近似相等, 有

$$\Delta l_i = \frac{1}{2k} \left| \sum_{j=1}^k (\sigma_{x_{ij}}^z + \sigma_{x_{ij}}^f) \times \frac{D_A \cdot D_B}{D_j} \right| + \frac{1}{2k} \left| \sum_{j=1}^k (\Delta\eta_{ij}^z + \Delta\eta_{ij}^f) \times \frac{D_A \cdot D_B}{D_j} \right| \quad (28)$$

又

$$\sum_{j=1}^k (\sigma_{x_{ij}}^z + \sigma_{x_{ij}}^f) \times \frac{D_A \cdot D_B}{D_j} \approx 0 \quad (29)$$

则有

$$\Delta l_i \approx \frac{1}{2k} \sum_{j=1}^k \left| (\Delta\eta_{ij}^z + \Delta\eta_{ij}^f) \times \frac{D_A \cdot D_B}{D_j} \right| \quad (30)$$

求得光电经纬仪判读点距反射体的近似距离后, 即可用第 1 章所述的方法对光电经纬仪测得的坐标值进行修正, 然后再以修正后的值为标准值统计被试雷达的系统误差。

3 示例

图 5 为在某型雷达精度检飞中获得的某条航路的一次差曲线。纵轴为测角一次差角度值, 横轴表示由航前 12 km 至航前 2 km 之间近所计算的 100 个点。

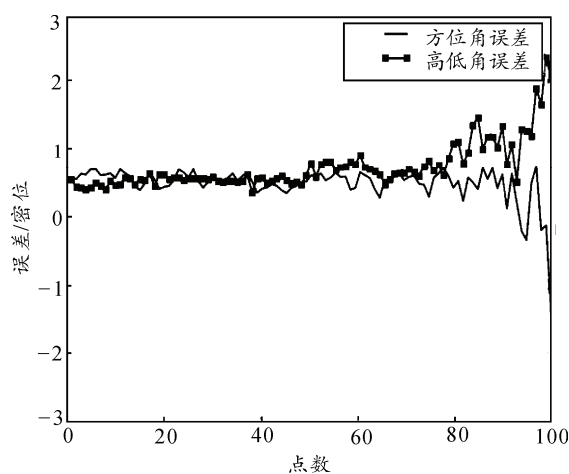


图 5 某条航路的一次差曲线

从图 5 明显可见, 随着距离的减小, 方位角和高低角系统误差增大, 原因是检飞靶机机腹下方装有曳光管, 试验采用光电经纬仪为标准值设备, 对点燃和未点燃曳光管的图像, 可以看到曳光的灰

度相对靶机明显要大, 在判读图像时, 经纬仪的判读点就会处于曳光尾焰上, 而雷达则是跟踪在靶机中、前部, 由此引入了体效应误差。

下面对标准值数据进行修正, 处理后得到一次差曲线示意图如图 6 所示。横、纵轴的定义与图 5 相同, 从图 6 可以看出, 改进后可以有效地削弱体效应误差, 使精度统计结果更接近被试品的真实状态。

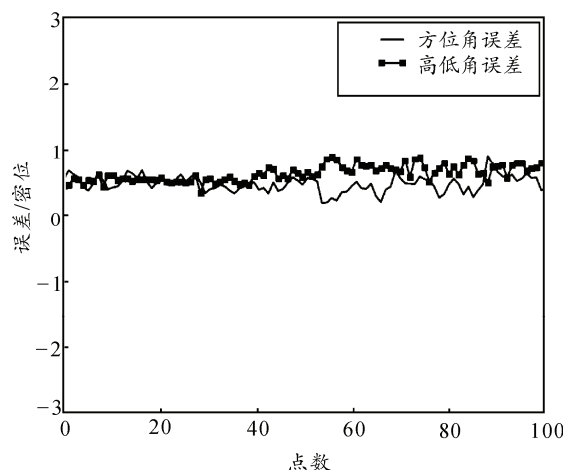


图 6 标准值修正后 2 条航路的一次差曲线

4 结论

分析结果证明: 笔者提出的对 GPS 和光电经纬仪测量数据修正的方法, 可以在跟踪雷达精度检飞试验数据处理中有效消除体效应误差, 从而提高被试雷达精度统计结果的准确度。

参考文献:

- [1] 吕元恒. 火控跟踪雷达系统精度分析[J]. 火控雷达技术, 2001(6): 31-37.
- [2] 马丽华, 朱可炎. 用 DGPS 检验雷达性能的方法和几个值得注意的问题[J]. 现代防御技术, 2005(8): 58-63.
- [3] 包苏和, 王福志, 刘继东, 等. 精度飞行试验中 GPS 动态定位数据可用性分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007(4): 75-78.
- [4] 贾金才, 杨秉喜, 等. GJB74A-98 军用地面雷达通用规范[S]. 北京: 中国军标出版社, 104-114.
- [5] 朱莹, 李文才, 段刚. 高炮火控精度分析方法[J]. 兵工自动化, 2006, 25(8): 1-2.