

采用相对熵评价雷达相对系统误差估值

高效, 敬东, 陈钢

(中国人民解放军93209部队, 北京100085)

摘要: 如何评价雷达相对系统误差估值的有效性是雷达校准过程中一个亟待解决的问题。本文借助信息论中相对熵的概念, 通过计算次站观测航迹线系统误差修正前后与主站观测航迹线的相对熵, 提出了次站雷达相对系统误差估值有效性评价指标和计算方法, 并进行了演示验证。该方法有助于提高雷达检飞、数据校准方法选择和雷达相对系统误差估值表计算过程中对系统误差估值评价的科学性、准确性和可操作性, 同时对改进多雷达航迹关联算法具有一定的借鉴意义。

关键词: 相对系统误差; 雷达航迹; 相对熵; 有效性评价; 加权直线航迹线参数迭代估计模型; 雷达检飞; 数据校准

中图分类号: TN957; TP274 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2020)04-0443-04

Application of Relative Entropy to Evaluation of Relative System Error of Radar

GAO Xiao, JING Dong, CHEN Gang

(Unit 93209 of PLA, Beijing 100085, China)

Abstract: How to evaluate the effectiveness of relative system error estimation of radar is an urgent problem in radar calibration. Based on the concept of relative entropy in information theory, the effectiveness evaluation index and the computing method of relative system error of sub-station radar are established in this paper by calculating the relative entropy between observation tracks of sub-station before and after system error correction and observation track of the master station. And demonstration and verification are also presented. This method can improve the scientificity, accuracy, and operability of the system error evaluation in the process of radar flight test, data calibration method selection and calculation of radar relative system error evaluation table. At the same time, it is useful for improving multi-radar track correction algorithm.

Key words: relative system error; radar track; relative entropy; effectiveness evaluation; iterative estimation model of weighted linear track parameters; radar flight test; data calibration

0 引言

雷达相对系统误差是指雷达在对目标进行测量时存在的相对于指定参照系的固定误差, 包括雷达动态测量中的测向误差 $\Delta\theta$ 、测距误差 $\Delta\rho$ 、仰角误差 $\Delta\alpha$ 、雷达站址标定误差 $(\Delta x, \Delta y)$ 和雷达组网应用中存在的坐标转换误差等^[1-4]。在雷达组网观测中, 动态目标的绝对位置多数情况下是不可知的, 我们比较容易得到的是在同一时间段内不同雷达对同一飞行目标的离散观测值。而相对于网内其他雷达来说, 总会有一部雷达的观测是精确的, 此时可以以该雷达(命名为主站)的测量值作为对目标位置的真实描述, 其他雷达(命名为

次站)以此为参照, 从而求得次站雷达相对于主站雷达的相对系统误差。

估计、消除单雷达测量中存在的系统误差有两种途径: 设备校准和数据校准^[1-3]。对于多雷达组网后的系统误差校准, 情况就更为复杂。如何评价一组系统误差估值或某种数据校准方法的有效性, 成为一个亟待解决的问题。

传统的系统误差估值有效性评价多采用“取点评价法”, 就是将同一时刻, 雷达测量位置点与目标在参照系中的位置点(这两个点又称为时间配准点)之间的直线距离作为基本评价依据^[5]。为了提高评价的可信度, 往往需要取多个时间配准点, 将多个时间配准点修正前后距离的平均值^[6-7]之比作为最终的系统误差估值有效性评价

指标。这种方法原理上比较科学,但在工程实现上,由于雷达异步工作,“多个时间配准点”在原始测量中几乎不存在,虽然采用卡尔曼滤波等方法可以外推得到配准时刻的目标位置点,但外推过程又不可避免地引入了新的计算误差,因此取点评价法可操作性及准确性不高。

我们针对传统方法从局部(单点)入手带来的问题与不足,引入信息论中相对熵的概念,通过选取典型航路(目标保持一定高度沿直线飞行)上的一组主、从雷达测量数据,整体比较次站观测航迹线系统误差修正前后与主站观测航迹线的相似性来评价系统误差估值的有效性以及修正效果。这样在提高准确性和可操作性的同时,简化了评价方法的复杂程度,方便了工程上的实现。

1 基于相对熵的系统误差估值有效性评价方法

在信息论中,相对熵用来衡量两个取值为正的函数的相似性,比如: X 为一非空集合, $f(x)$ 和 $g(x)$ 是 X 上的两个离散随机概率分布函数,则 $f(x)$ 和 $g(x)$ 之间的相对熵定义为

$$KL(f(x) \| g(x)) = \sum_{x \in X} f(x) \cdot \log_2 \frac{f(x)}{g(x)} \quad (1)$$

对于上式,可以推导^[8]:两个完全相同的函数,它们的相对熵等于零;相对熵越大,两个函数的差异越大,反之,相对熵越小,两个函数的差异越小;另外相对熵是不对称的,即

$$KL(f(x) \| g(x)) \neq KL(g(x) \| f(x))$$

为了便于使用,香农等人提出了新的相对熵计算方法,即:

$$JS(f(x) \| g(x)) = \frac{1}{2} [KL(f(x) \| g(x)) + KL(g(x) \| f(x))] \quad (2)$$

我们采用式(2)作为雷达相对系统误差估值有效性评价的基本依据,具体方法步骤如下:

步骤 1:选取主、次站雷达对同一空中目标的一段同时段观测数据。“同时段”是指两部雷达观测数据首点和末点时间差均不大于 1 个雷达探测周期(一般为 10 s 或 20 s)。在目标作处于直线运动状态时,每部雷达观测数据点数量一般不少于 10 点,否则,每部雷达观测数据点 4~6 点即可。

这样做的目的是选取较短时间内的单雷达测量点集合,既能保证所选测量点即时反映目标当前整体航迹走势,又要兼顾单雷达航迹线参数估计过程中消除随机误差影响的最少样本数要求。

步骤 2:对主站雷达原始观测数据(极坐标形式)进行坐标变换,得到对应的统一直角坐标数据 $\{(X_{tzi}, Y_{tzi}), i=1, 2, \dots, n\}$, n 表示主站雷达观测数据总点数。

步骤 3:分别对次站雷达原始观测数据、系统误差修正数据进行坐标变换,得到两组统一直角坐标 $\{(X_{tcj}, Y_{tcj}), j=1, 2, \dots, m\}$ 和 $\{(X_{lxj}, Y_{lxj}), j=1, 2, \dots, m\}$, m 表示次站雷达观测数据总点数。此处次站雷达系统误差修正数据是指次站雷达原始观测数据按照次站系统误差估值 $(\Delta\rho, \Delta\theta, \Delta\alpha, \Delta x, \Delta y)$ 修正后的数据。

步骤 4:在统一直角坐标系中,对于测量点数据 $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, p\}$,将 X 坐标作为自变量, Y 坐标作为因变量,分别对主、次站雷达观测数据和次站雷达系统误差修正数据进行曲线拟合,得到相应的参数估计。曲线拟合方法可以采用最小二乘或切比雪夫曲线拟合法,为了防止过拟合,拟合多项式的项数一般取 2 或 3 即可^[9]。本文采用加权直线航迹线参数迭代估计模型(详见下一节),得到主站观测航迹线参数 (k_z, d_z) (分别表示直线的斜率和截距)、次站观测航迹线参数 (k_c, d_c) 和次站修正航迹线参数 (k_x, d_x) 。

步骤 5:计算次站观测航迹线与主站观测航迹线的相对熵 JS_c 。相对熵越小,表明两条航迹线越相似,过程如下:

① 计算 $f(x_i)$ 和 $g(x_i)$ 。

$$f(x_i) = k_z x_i + d_z, g(x_i) = k_c x_i + d_c, \quad i=1, 2, \dots, n+m \quad (3)$$

式中, $x_i \in \{(X_{tzi} | i=1, 2, \dots, n) \cup (X_{tcj} | j=1, 2, \dots, m)\}$, 表示主站观测点与次站观测点横坐标的并集, n 和 m 分别表示主、次站雷达的观测点数。

② 计算 $KL(f(x) \| g(x))$ 和 $KL(g(x) \| f(x))$ 。

$$KL(f(x) \| g(x)) = \sum_{i=1}^{n+m} f(x_i) \log_2 \frac{f(x_i)}{g(x_i)} \quad (4)$$

$$KL(g(x) \| f(x)) = \sum_{i=1}^{n+m} g(x_i) \log_2 \frac{g(x_i)}{f(x_i)} \quad (5)$$

③ 计算 JS_c 。

$$JS_c = \frac{1}{2} [KL(f(x) \| g(x)) + KL(g(x) \| f(x))] \quad (6)$$

步骤6:计算次站修正航迹线与主站观测航迹线的相对熵 JS_x 。计算过程与步骤5类同。

步骤7:次站修正航迹线系统误差估值有效性指标 V 表示为

$$V = \left(1 - \frac{JS_x}{JS_c}\right) \times 100\% \quad (7)$$

$V \in [0, 1]$ 时, V 越大, 表示系统误差估值越有效, 航迹修正效果越好。 $V < 0$ 时, 表示系统误差估值不仅完全无效, 反而加剧了主、次站雷达观测航迹的分裂程度。

2 加权直线航迹线参数迭代估计模型

某时间段内单雷达观测到典型航路上的某一飞行目标的总点数为 n , 所有测量点转换到统一直角坐标系后表示为 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 。我们定义单一测量点 (x_i, y_i) 对目标航迹线参数估计的贡献率为该点的权值, 记为 v_i 。首先按照以下方法计算单一测量点的权值。

基于直线方程一般式: $y - k_0x - d_0 = 0$ (k_0 为直线的斜率, d_0 为直线在 Y 轴上的截距), 测量点 (x_i, y_i) 到直线的垂直距离 l_i 表示为

$$l_i = \frac{y_i - k_0 \times x_i - d_0}{\sqrt{1 + k_0^2}} \quad (8)$$

用所有单雷达观测点 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 到该直线的垂直距离 l_i 的平方和最小作为条件构造直线, 计算在此条件下的这条直线的最佳参数, 即为不加权直线航迹线参数估计模型:

$$f(k_0, d_0) = \sum_{i=1}^n (l_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - k_0 \times x_i - d_0}{\sqrt{1 + k_0^2}}\right)^2 = \min \quad (9)$$

求解式(9)得到 (k_0, d_0) 后, 根据式(8)可以计算所有的测量点 (x_i, y_i) 到该直线的垂直距离 l_i ,

令 $P_i = \frac{1}{|l_i|}$, 则得到测量点 (x_i, y_i) 的权值 v_i 为

$$v_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

在测量点 (x_i, y_i) 对应的权值 v_i 已知基础上, 同样基于直线方程一般式, 我们用所有单雷达观测点 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 到某直线的垂直加权距离 $(v_i \times l_i)$ 的平方和最小作为条件构造直线, 计算在此条件下的这条直线的最佳参数 (k, d) , 即为单雷达加权直线航迹线参数估计模型^[10]:

$$f(k, d) = \sum_{i=1}^n (v_i \times l_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left(v_i \frac{y_i - k \times x_i - d}{\sqrt{1 + k^2}}\right)^2 = \min \quad (11)$$

对于式(11)的求解, 可以构造方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(k, d)}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial f(k, d)}{\partial d} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解(12)式可以得到一组合理的直线参数解 (k, d) 。然后计算所有测量点 (x_i, y_i) 到新直线的加权距离之和 $f_m(k, d)$ (m 表示迭代次数):

$$f_m(k, d) = \sum_{i=1}^n \left| v_i \frac{y_i - kx_i - d}{\sqrt{1 + k^2}} \right| \quad (13)$$

直到 $f_m(k, d)$ 不再减小为止, 此时的 (k, d) 即为最佳直线参数; 否则按照当前 (k, d) 重新计算所有测量点 (x_i, y_i) 的权值 v_i , 回归对式(10)的求解过程。

3 方法应用与分析

使用本文方法, 我们对某雷达网中一部次站雷达相对主站雷达的两种相对系统误差估值方案的有效性进行评价。

对图1中的次雷达原始测量航迹线、次雷达修正航迹线1、次雷达修正航迹线2相对于主雷达测

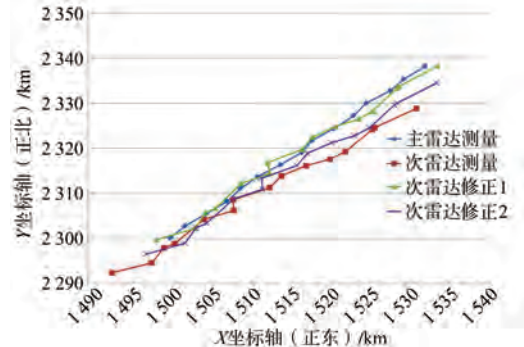


图1 主、次雷达测量数据和两组次雷达相对系统误差修正数据显示图

量航迹线的相对熵分别进行了计算,计算结果如下:

主雷达与次雷达原始测量航迹线的相对熵 $JS_c = 0.188\ 534$,主雷达原始测量与次雷达修正航迹线 1 的相对熵 $JS_{2x} = 0.002\ 087$,主雷达原始测量与次雷达修正航迹线 2 的相对熵 $JS_{2x} = 0.084\ 058$ 。则次站两组相对系统误差估值有效性指标 V_1 和 V_2 计算结果分别为

$$V_1 = (1 - \frac{JS_{1x}}{JS_c}) \times 100\% = 98.89\% \quad (14)$$

$$V_2 = (1 - \frac{JS_{2x}}{JS_c}) \times 100\% = 55.41\%$$

由 $1 > V_1 > V_2 > 0$ 可以得出以下结论:

① V_1 和 V_2 对应的系统误差估值均能有效减小主、次站雷达观测航迹的分裂程度,说明次站雷达的两组相对系统误差估值方案都有效;

② 在减小主、次站雷达观测航迹的分裂程度上, V_1 对应的系统误差估值要优于 V_2 对应的系统误差估值,取得了较好的航迹修正效果,与图 1 的观察结果一致。

为了进一步验证本文方法在工程上的有效性,我们将图 1 中的主、次站雷达测量数据和次站雷达相对系统误差修正数据加入正态随机误差,连续进行了 50 次模拟,次站两组相对系统误差估值方案有效性指标 V_1 和 V_2 计算结果如图 2 所示,均有 $1 > V_1 > V_2 > 0$ 的一致性结论,表明本方法有效,且受随机误差影响很小,可以应用于实际系统中。

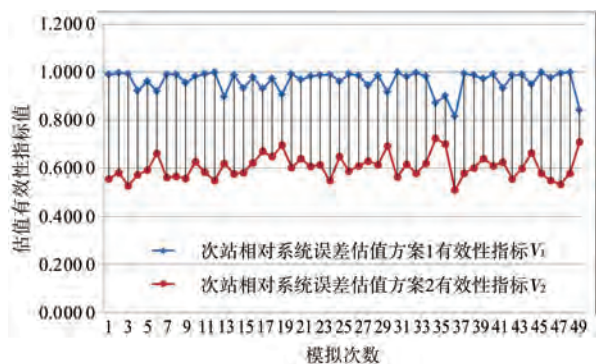


图 2 次站雷达相对系统误差估值有效性指标对比图

4 结束语

本文通过计算次站观测航迹线系统误差修正前后与主站观测航迹线的相对熵,构建次站修正航迹线系统误差估值有效性指标,用以评价系统误差估值的有效性以及修正效果。在工程应用

中,很容易得到典型航路上的主、次站观测数据,既降低了检飞成本,又可以保证加权直线航迹线参数迭代估计模型的适用性,进而提高本评价方法的准确性。本方法有助于提高雷达阵地检飞、数据校准方法选择和雷达相对系统误差估值表计算过程中对系统误差估值评价的科学性、准确性和可操作性,从而提升雷达网目标状态估计和多雷达数据融合的质量。本文给出的方法,对研究基于位置信息以及目标空间运动特征的航迹关联算法也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李鸿艳,冯新喜.多雷达系统几种误差配准方法的分析与比较[J].电子对抗技术,2001,16(1):37-42.
- [2] 高效,田科钰,钟恢扶.采用 LRSERM 方法进行多雷达数据配准[J].情报指挥控制系统与仿真技术,2004,26(2):62-64.
- [3] 王忠强.基于 ADS-B 的雷达系统误差校准算法研究[J].系统仿真技术,2016,12(1):30-34.
- [4] 张远,曲成华.雷达组网目标定位误差实时校正算法研究[C]//第九届全国雷达学术年会论文集,山东烟台:中国电子学会无线电定位技术分会,2004:106-109
- [5] 黄友澎.多传感器多目标航迹相关与数据合成若干关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [6] 李启元,段立,李亚楠.海战场目标航迹间距离聚类方法[J].计算机与数字工程,2010,38(5):28-30.
- [7] 曾昭博,王睿,刘伟,等.基于模糊平均综合相似度的航迹关联算法[J].电讯技术,2009,49(8):9-12.
- [8] [美]吴军.数学之美[M].2版.北京:人民邮电出版社,2014:68-70.
- [9] 李航.统计学习方法[M].北京:清华大学出版社,2012:11-13.
- [10] 高效,戴乐,李光伟,等.雷达相对系统误差估值有效性评价方法:中国 201910378283.6 [P].2019-05-08.

作者简介:



高 效 男,1972 年生,河北,高级工程师,研究方向:预警指挥信息系统。
E-mail:2284207363@qq.com

敬 东 男,1969 年生,陕西,高级工程师,研究方向:侦察监视情报系统。

陈 钢 男,1975 年生,湖南,副研究员,研究方向:雷达综合保障与指挥自动化。