

组合预测在外弹道数据处理中的应用

崔书华 李小龙 刘军虎

(中国西安卫星测控中心)

摘要 利用组合预测方法中方差倒数加权 (Variance Reciprocal Weighting, VRW) 原理对测控网中多台外弹道跟踪测量设备测量数据的单独预测结果进行组合预测。计算数据结果表明, 方差倒数加权预测计算结果的可靠性优于任何单次预测结果, 获得的计算结果更逼近实际弹道。

关键词 组合预测 权重系数 精度分析

1 引言

组合预测的基本思想是根据问题的特征, 综合利用单项预测模型的有用信息, 准确、合理地进行预测。组合预测是预测理论研究的主要内容, 由于能够有效地提高预测精度, 故而受到国内外预测界的广泛重视, 国内外学者纷纷探讨不同预测的最优组合方法。尤其近年来, 组合预测方法已成为预测领域中的一个研究方向, 组合预测方法也得到了广泛的应用。

在航天测控网系统中, 由于各台跟踪测量设备的设计方案、工作原理及结构不同, 以及不同的测量条件下、不同的测量方式和不同的测量者会产生不等精度的测量。由于不等精度测量, 会引发各跟踪测量设备测量结果的不确定度的差异。因此, 应多用可靠性好的测量数据, 而让可靠性小的测量数据占少一些的比例, 也就是说组合预测的关键是权系数的问题。面对多台跟踪测量数据, 如何综合利用单台预测方法提供的有效信息, 突出各个方法的优点, 避免各种方法的缺点, 获得最优的预测结果, 是组合预测要解决的问题。

组合预测方法中有三个概念需进行说明: 设 $X(t)$ 为被估计的随机矢量, $Z(t)$ 为测量随机矢量, 其方程为:

$Z(t) = H(x(t), v(t), t)$, 式中 $v(t)$ 为测量噪声矢量, $H(\cdot)$ 是 $x(t), v(t)$ 和 t 的已知矢量函数, 最优滤波就是利用 t_0 到 t 过程中的量测值 $Z(t) (t_0 < \tau \leq t)$, 通过一个滤波器去估计 t' 时刻的 x 值, 使之在一定统计意义下的 $\hat{X}(t'|t)$ 为最优。如果 $t'=t$, 则这种滤波器成为最优估计, $\hat{X}(t'|t)$ 成为 $x(t')$ 的最优滤波器值或最优

估计; 如果 $t' > t$, 则这种滤波成为最优预测; 如果 $t' < t$, 则这种滤波成为最优平滑^[1]。本文讨论的是最优估计。

2 组合预测原理及应用

2.1 组合预测原理

组合预测的方法是建立预测的几个单台测量数据对飞行器目标进行估计, 再将各估计值用加权的方法组成一个综合预测值。

假设选取种预测方法进行组合预测, 各单项预测方案第 t 时刻的预测误差为 $e_{it} (i=1, 2, \dots, n; t=1, 2, \dots, N)$; 第 i 种预测方法的预测误差向量为 $E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iN})^T$, 又记 $e = [E_1, E_2, \dots, E_n]$ 为预测误差矩阵, $E = e^T e$ 为预测误差信息矩阵。

$$E = \begin{bmatrix} E_1^T E_1 & E_1^T E_2 & \dots & E_1^T E_n \\ E_2^T E_1 & E_2^T E_2 & \dots & E_2^T E_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_n^T E_1 & E_n^T E_2 & \dots & E_n^T E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nn} \end{bmatrix}$$

式中, $E_i^T E_i = \sum_{j=1}^N e_{ij}^2 = E_{ii}$, $E_i^T E_j = \sum_{j=1}^N e_{ij} e_{jj} = E_{ij}$

VRW 是指组合权重为:

$$k_i = \frac{1}{E_{ii}} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{ii}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

的组合预测方法。权重的范围: 对于权重向量 $K_i (K_i$ 为第 i 个模型在综合预测中的偏重程度), 一般情况下为了保持综合精度的无偏性, K_i 应满足的条件为:

$$K_i = [K_1, K_2, \dots, K_n]^T,$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1, 0 \leq k_i \leq 1$$

设 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是变量 y 的第 i 种预测值, 则方差倒数组合预测的模型为:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n k_i y_i \quad (2)$$

(2)式中,直观上的合理性在于 y_i 的方差愈小,其预测值的偏离就愈小,即愈有效,此时的权重系数也就愈大,从而在 \hat{y} 所占有的成分就愈大,对组合预测的贡献当然愈大。VRW 组合预测方法在一定程度上分散了单次预测模型形式选择不当的风险,降低了模型的不确定性(Model Uncertainty)。可利用平方和误差和均方误差的方法对组合预测的效果进行评价。

平方和误差:

$$R_{SS} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \quad (3)$$

均方误差:

$$\sigma = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

2.2 原理应用

外弹道数据处理是对弹道和运载火箭飞行试验中外测系统获取的数据进行加工、计算得到弹道参数的过程。外弹道测量系统中,参加跟踪测量的设备有光学测量系统、脉冲雷达测量系统、连续波雷达系统及 GPS 等不同设备,在同一跟踪测量系统中又存在不同型号和不同设计结构的设备。每种型号的跟踪测量数据在各自的飞行器目标弹道定位计算中均有各自的精确算法,但在数据链路中,每台设备跟踪测量的目标定位结果存在不同的不确定性。为获取最终飞行器弹道参数的最优估计,应充分利用多台测量数据的冗余信息进行组合计算。

组合预测可以综合利用各单台测站预测的方法提供的弹道参数信息,集成不同信息源的预测结果,从而能最有效地提高预测的精度。方差倒数加权预测方法是组合预测中行之有效的预测方法,它将预测的单个模型对飞行器目标参数进行估计后,再将各估计值用加权的方法组成一个综合预测值,获得高精度的弹道数据。

设经纬仪(具有测距数据)、雷达及 GPS 各单台跟踪测量数据计算得到飞行器目标在发射坐标系中的位置 (x_i, y_i, z_i) 、速度 $(\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i)$ 及精度 $(\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \sigma_{z_i})$ 、 $(\sigma_{\dot{x}_i}, \sigma_{\dot{y}_i}, \sigma_{\dot{z}_i})$, 根据 VRW 法,其各参数的权重为:

$$\begin{aligned} W_{x_i} &= \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{x_j}^2} & W_{y_i} &= \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{y_j}^2} & W_{z_i} &= \frac{1}{\sigma_{z_i}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{z_j}^2} \\ W_{\dot{x}_i} &= \frac{1}{\sigma_{\dot{x}_i}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{\dot{x}_j}^2} & W_{\dot{y}_i} &= \frac{1}{\sigma_{\dot{y}_i}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{\dot{y}_j}^2} & W_{\dot{z}_i} &= \frac{1}{\sigma_{\dot{z}_i}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{\dot{z}_j}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 n 为预测方法数。

目标定位数据及速度为:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ \hat{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot W_{x_j} \\ \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot W_{y_j} \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} \cdot W_{z_j} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_i \\ \dot{\hat{y}}_i \\ \dot{\hat{z}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \dot{x}_{ij} \cdot W_{x_j} \\ \sum_{j=1}^n \dot{y}_{ij} \cdot W_{y_j} \\ \sum_{j=1}^n \dot{z}_{ij} \cdot W_{z_j} \end{bmatrix} \quad (6)$$

目标定位精度及速度精度为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}_i} \\ \sigma_{\hat{y}_i} \\ \sigma_{\hat{z}_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{x_j}^2}} \right)^{1/2} \\ \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{y_j}^2}} \right)^{1/2} \\ \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{z_j}^2}} \right)^{1/2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{\dot{\hat{x}}_i} \\ \sigma_{\dot{\hat{y}}_i} \\ \sigma_{\dot{\hat{z}}_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{\dot{x}_j}^2}} \right)^{1/2} \\ \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{\dot{y}_j}^2}} \right)^{1/2} \\ \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_{\dot{z}_j}^2}} \right)^{1/2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 应用效果

利用三台测站跟踪测量数据,依次称为 A 数据、B 数据、C 数据,即各测站得出的目标在发射坐标系中的弹道参数,利用方差倒数加权计算方法对弹道参数进行综合计算估计,获取预测的数据结果。

从图 1、图 3、图 5 可以看出,方差倒数加权预测计算获取的飞行器外弹道的目标定位精度优于任何单次预测精度,VRW 组合预测是目标变量的最优估计。从图 2、图 4、图 6 可以看出,飞行器弹道位置数据值更加靠近单次预测中的高精度数据,均方误差最小,保证了数据的有效性。

3 结论

通过数据计算及应用证明,利用组合预测计算方法进行多台设备测量数据的处理计算,增加了结果的可信程度,降低了弹道数据的不确定性。同时,避免了用多台设备的测量数据直接进行交会数据处理时可能出现的病态矩阵。该方法的实现,为实战任务的外弹道数据处理拓宽了计算方法。此方法的应用不仅实现了多台测量数据的综合计算弹道参数的

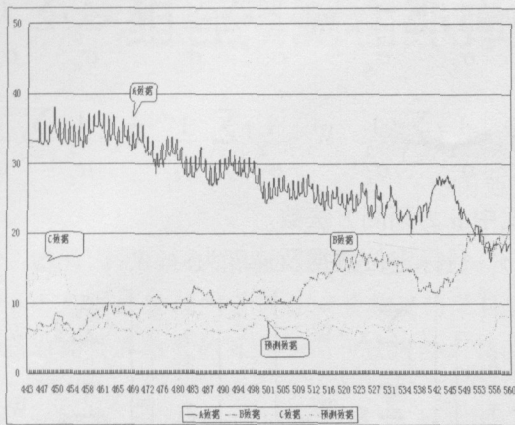


图 1 X 方向坐标精度

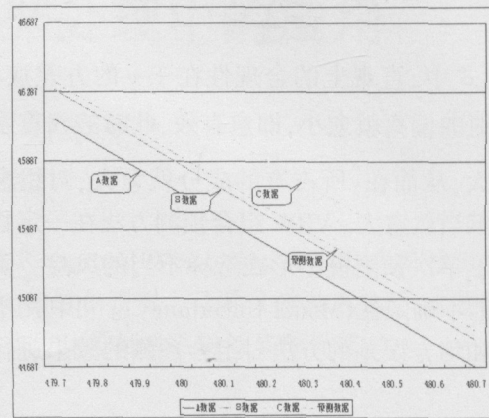


图 4 Y 方向坐标预测效果局部放大图

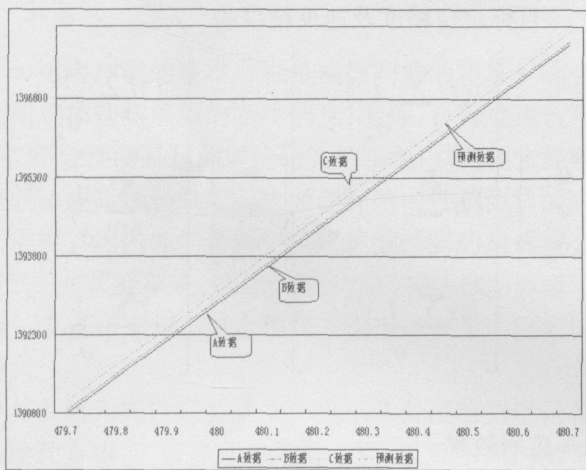


图 2 X 方向坐标预测效果局部放大图

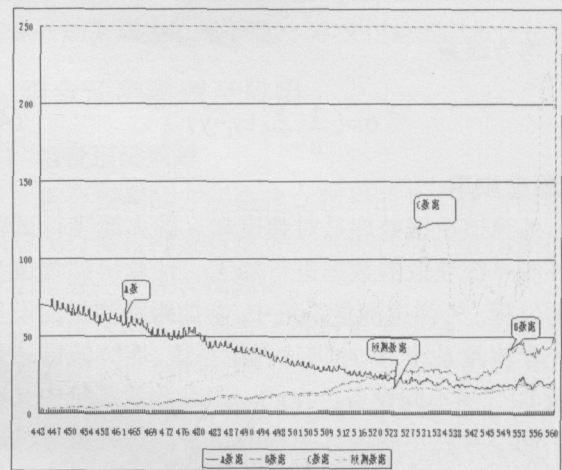


图 5 Z 方向坐标精度

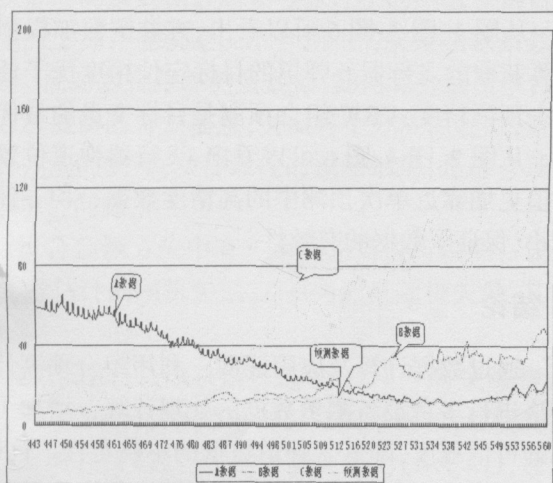


图 3 Y 方向坐标精度

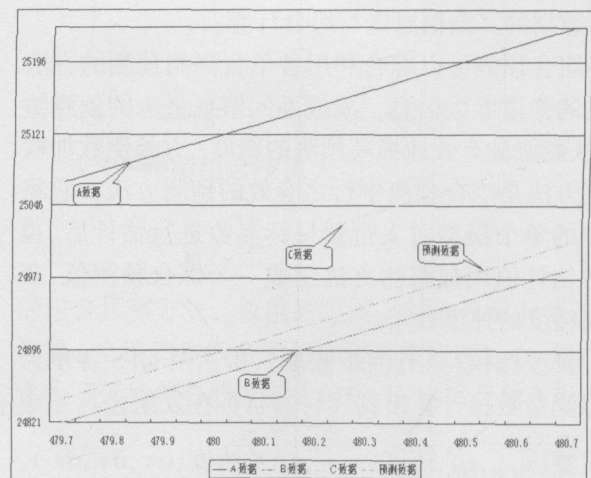


图 6 Z 方向坐标预测效果局部放大图

(下转第 55 页)

度。频率漂移率的正、负决定加速度的正、负。

4 时差调整

综上所述,时统站本地时钟给出的时刻与参考(标准)时间信号间的时差不可能保持不变,随着时间的推移,时差会越来越来大。当时差超过要求的同步范围时,需要对本地钟的时差进行调整,调整方法如下:

一种是频率阶跃,也就是对时钟频标的振荡频率进行调整。如果频标的漂移率较大,以实施频率阶跃较为合适。

另一种是时刻阶跃,也就是对时钟给出的时刻进行调整。如果频标的漂移率较小以实施频率时刻阶跃较为合适。

一般来说,对石英钟宜采用频率阶跃,而对原子钟采用时刻阶跃。

如果时统站在第一次定时操作持续一段时间后再进行一次定时操作,则可消除由于准确度、漂移率(老化率)等在两次定时操作之间累积的时差。

为了减少频标频率准确度对时差的影响,时统站应经常对频标频率准确度进行测量和调整,使其尽量接近标称值。◇

参考文献

- [1]童宝润.时间统一技术.国防工业出版社.2003.9.
- [2]《计量测试技术手册》编委会.《计量测试技术手册》时间频率.中国计量出版社.1996.10.

(上接第 18 页)

- [2]祁大勇.一种基于单片机控制的导弹舵机伺服系统的建模与仿真[J].测试技术学报,1996(10):282-286
- [3]黄忠霖.控制系统 MATLAB 计算及仿真[M].北京:国防工业出版社,

2004:159-162.

- [4]朱中惠.推力矢量控制伺服系统[M].北京:宇航出版社,1995:457-475
- [5]刘 胜.PWM BDCM 高精度伺服系统设计与实现[J].哈尔滨工程大

(上接第 35 页)

部件的设计、实现,只需要简单地复用这种显示模式即可。这样,不仅能提高开发工作效率,节省大量时间和资源,而且该部分软件代码的可靠性得到保障,不再需要进行更多显示部件的测试工作。该技术已

在卫星工程 C³I 系统中得到了成功应用。◇

参考文献

- [1]Jeff Prosize.MFC Windows 程序设计,清华大学出版社,2001
- [2]载人航天发射场,中国酒泉卫星发射中心,2003

(上接第 46 页)

计算,而且提高了数据处理精度,为后续的任务提供了有效的数据处理途径。此方法不仅可运用在外弹道事后数据处理中,同样可以用到准实时的外弹道参数的优化估计计算。◇

参考文献

- [1]唐 纪等.组合预测方法评述.预测,1999.2
- [2]王正明等.弹道跟踪数据的校准与评估.长沙:国防科技大学出版社,1999.3