

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.009

引用格式:李增有,戴由旺.外弹道测量多测速元数据融合同步修正方法[J].电讯技术,2014,54(8):1087-1091. [LI Zeng-you, DAI You-wang. Synchronization Modification Method of Multi-Velocity-Elements in Exterior Trajectory Measurement Based on Data Fusion[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8):1087-1091.]

外弹道测量多测速元数据融合同步修正方法*

李增有**,戴由旺

(解放军91550部队,辽宁大连116023)

摘要:采用数据融合算法完成高精度外弹道测量对各测元时间同步有着严格的技术要求。在分析时间不同步对融合弹道测速精度的影响基础上,分析了引起无线电测速时间不同步的因素,并构建了有效的数学修正模型。针对融合弹道速度异常超差现象,依据对测速误差理论模型公式和无线电测速原理分析结果,提出基于各测量设备测速数据解算模型的积分点移位和传播延迟修正模型算法,并应用于潜射弹的数据融合同步修正。工程应用结果表明,融合弹道偏差优于0.04 m/s,较修正前精度提高了4倍以上。由于陆基无线电测量系统的测距、测角具有类似的时间不同步特征,因此该模型也可作为多测元融合弹道解算过程中的一般方法推广使用。

关键词:测控;外弹道测量;多测速元;数据融合;时间不同步修正

中图分类号:V556.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1087-05

Synchronization Modification Method in Multi-Velocity-Elements in Exterior Trajectory Measurement Based on Data Fusion

LI Zeng-you, DAI You-wang

(Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: Using data fusion algorithm to complete the high-precision exterior ballistic measurement has strict technical requirements for the time synchronization of each measuring element. By analyzing the effect of time being not in synch on ballistic measurement precision of fusion, the factors resulting in time not synchronized of velocity measurement are discussed, and effective mathematic correction model is established. Aiming at phenomenon of the fusion ballistic velocity anomalies ultra difference, integral point shift and propagation delay correction model algorithm based on measurement equipment velocity data calculation model is proposed according to measurement error model formula and radio measurement results, and it is applied in synchronization correction of the sub projectile data fusion. The application results show that the integration of the trajectory deviation is better than 0.04 m/s, the accuracy is improved by more than 4 times. Because the distance and angel of subgrade radio measurement system have similar features of time being not in synch, the model can also be used as a general method in the processing of measurement element fusion trajectory calculation.

Key words: TT&C; exterior ballistic measurement; multi-velocity-element; data fusion; time synchronization modification

* 收稿日期:2014-03-10;修回日期:2014-05-07 Received date:2014-03-10;Revised date:2014-05-07

** 通讯作者:li_zeng_you@163.com Corresponding author:li_zeng_you@163.com

1 引言

随着现代导弹试验技术的发展进步,为满足大射程和高精度弹道测量要求,一般都需要多台套、不同测量体制的无线电设备甚至是光学联合无线电测量设备通过交会测量完成^[1]。数据融合解算就是针对多体制多台套设备的多测元联合弹道解算方法。多年的应用表明,数据融合解算方法可以充分利用不同测量体制的测量数据,对于大弹道高精度测量起到了良好的效果,但是其处理结果的合理性和精度也受制于诸多因素,如各测元的随机误差、系统误差模型以及统计估计方法等^[2]。其中,各测元的时间同步误差是系统误差模型中的重要一环,且随着不同体制设备和飞行器动态的不同而不断变化。对于陆基测量系统而言,在短基线、精度要求不高并具备统一的时统基础上,时间不同步的误差影响并不显著,甚至是可以忽略的,但是对于厘米级测速精度、大弹道(基线数百或数千公里)、高动态(数倍音速)的测量要求,仅仅具备统一的时统是不够的,融合弹道误差包含了诸多无法忽略的影响因素,采用一般性的不同步处理方法,弹道偏差仍具有明显的不同步特征,如本文所论述的某弹道导弹的融合处理结果。因此,必须深入研究时间不同步的各种可能因素,并予以消除,才能保证融合弹道处理结果的合理性和处理精度。本文对某典型系统测速误差理论模型公式和测速原理进行了详细分析,在明确不同测量设备测速数据解算模型的基础上,采用积分点移位和传播延迟修正模型算法完成了两项主要时间不同步误差的修正。

2 时间不同步对弹道速度参数的影响

目前靶场的各测量设备都是在统一的时间基准下工作,同步精度优于30 μs,理论上时间不同步误差对融合弹道测速精度的影响是可以忽略的^[3]。但是考虑到各体制测量设备尤其是测速设备数据采集传输、时标处理机制上的不同,往往会带来不可忽略的时间上的不同步差异^[4],参照相关文献所论述的时间不同步误差与弹道速度参数误差的传播模型,可以得到时间不同步引起的弹道速度参数的误差^[5]

$$\Delta \dot{X} = A^{-1}(\Delta \dot{R} - A \Delta L) \quad (1)$$

式中, $\Delta \dot{R}$ 为测速元素的误差向量, A 为布站几何向量, ΔL 为测量向量的误差向量。

其中,测速元素 \dot{R} 的时间不同步误差为

$$\Delta \dot{R} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{R}_1 \\ \Delta \dot{R}_2 \\ \dots \\ \Delta \dot{R}_i \end{bmatrix} = \dot{R}_i \Delta t = \begin{bmatrix} \dot{R}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{R}_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dot{R}_i \end{bmatrix} \Delta t = \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \\ \dots \\ \Delta t_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, \dot{R}_i 为第 i 站与目标的径向加速度, Δt_i 为 i 站的时间不同步误差。

依据公式(2),影响融合弹道解算精度的主要因素包括跟踪目标的径向加速度、时间不同步差。体现在弹道特征段上,主要是远距离、高动态段落。如图1所示,某测量设备的速度测元与融合弹道比对曲线可以看出,在级间段(高加速度段)140 s、180 s附近速度测元与融合弹道的偏差显著,最大可达0.2 m/s左右。如何消除这种由于时间不同步带来的测量偏差是不同体制设备多测元数据融合的基础。

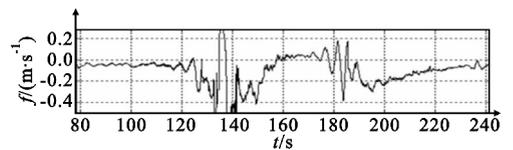


图1 典型不同步引起的测速偏差曲线图

Fig. 1 Typical curve of velocity offset caused by out-synch

3 速度测元时间不同步原因分析及修正方法

在靶场现有无线电测速设备的技术阶段,影响速度测元不同步的主要因素包括速度积分点差异和电波传播延迟差异两个方面。

3.1 积分点差异原理

基于多谱勒原理实现测速的设备,在一定载波环路带宽的条件下,一般采用提高采样频率和积分平滑方法提高测速精度,这就意味着测量数据与封装时标存在不同步性,以靶场典型测控设备的数据采样封装过程为例,如图2所示,具体过程如下:速度数据采样率80 Hz,即每一个80 Hz脉冲采一帧速度数据。以 T_s 为例: T_s (秒脉冲)到时刻,将采样帧计数置0,数据与时标关系 ($F = 0, T_s, V_0$)。11.5 ms后第二帧数据 V_1 到,时间累加12.5 ms ($F = 1, T_s + 12.5 \text{ ms}, V_1$),再一帧 V_2 到继续累加12.5 ms

($F=2, T_{s_}+25\text{ ms}, V_2$), 依次类推, 分别为 $V_3(F=3, T_{s_}+37.5\text{ ms}, V_3)\cdots V_{76}(F=76, T_{s_}+750\text{ ms}, V_{76})$, $V_{77}(F=77, T_{s_}+762.5\text{ ms}, V_{77})$, $V_{78}(F=78, T_{s_}+775\text{ ms}, V_{78})$, $V_{79}(F=79, T_{s_}+787.5\text{ ms}, V_{79})$ 。第 81 个 80 Hz 脉冲到时刻, 帧计数 $F=0$, 数据计为 V_0 , 对应数据封装为 $(F=0, T_s, V_0)$, 后续循环。依据上述过程, 时标与数据的不同步表现在两个方面。

(1) 一个采样周期内未进行再采样处理
在该条件下, 采样时标与采样数据是严格同步

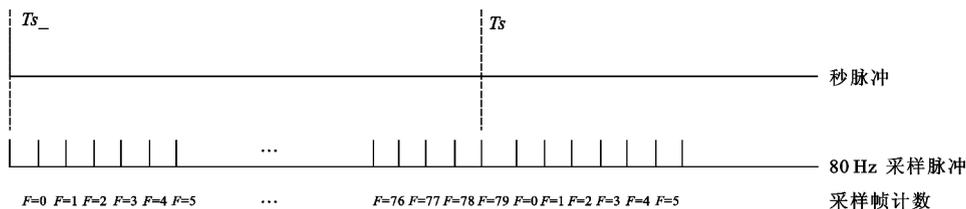


图 2 典型测速数据采样流程图
Fig. 2 Typical flow chart of velocity data sampling

3.2 电波传播延迟差异原理

所谓的电波传播延迟差异就是由于不同测控设备相对跟踪目标的电波传播的径向距离差异所造成的采样数据的不同步现象。

如图 3 所示, 假设在 A 点跟踪目标接收并转发测量信号为 $f_0 = A\sin(\omega t + \Phi_0)$, 该信号经 τ 时间到达 B 点, 地面设备接收到 $f_0 = A\sin(\omega t + \Phi_0)$ 信号, 实际的采样数据为: 时标 $T_1 = T_0 + \tau$, 数据为 $V_{f_0} = V_0$ 。依据无线电测量设备的数据采样流程, 对应 B 点的准确的采样数据应当为: 时标 $T_1 = T_0 + \tau$, 数据为 $V_{f_0} + a\tau = V_1$, a 为 A 至 B 点间的平均加速度。当多台测量设备进行弹道融合过程中, 由于布站原因, 基线越长各站至目标的径向距离、径向加速度的差异越大, 导致多台测量数据融合过程中存在不同程度的时间不同步问题。径向距离、径向加速度越大, 数据的不同步性越明显。

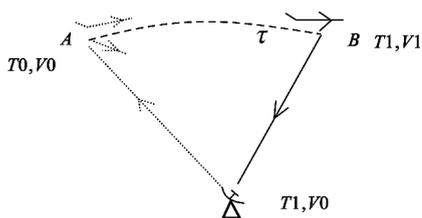


图 3 电波传播延迟差异原理图

Fig. 3 Principle diagram of delay difference in electromagnetic wave transmission

的, 缺点是采样频率过低, 测速精度较差。

(2) 一个采样周期内进行了再采样处理

依据图 2 所示过程, 所谓再采样, 就是任一点的测速数据并不是当前采样时间的瞬时速度, 而是当前采样时间的前一个或后一个采样周期内的平均速度, 在该条件下, 采样时标与采样数据是不同步的, 同步差依据积分点的前后、跟踪目标的弹道特点有所不同。这种处理方式可以显著提高测速精度, 缺点是数据处理过程相对复杂。

3.3 修正模型

对积分点和传播延迟的修正可以通过对时间或数据进行修正。工程实践表明, 对时间修正最简单, 但由于径向距离的动态变化导致事后数据处理需要进行不均匀插值, 数据量较大的条件下, 处理较复杂, 以下给出对数据的修正模型, 如图 4 所示。

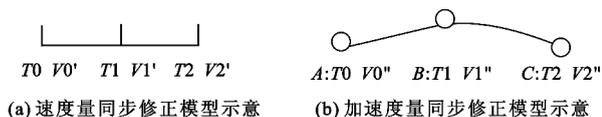
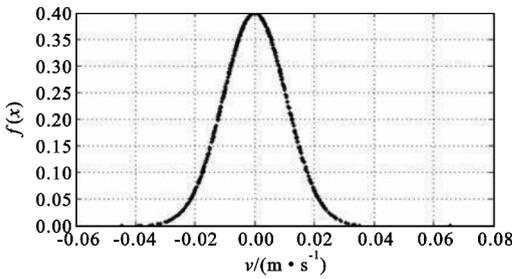


图 4 同步修正模型示意图

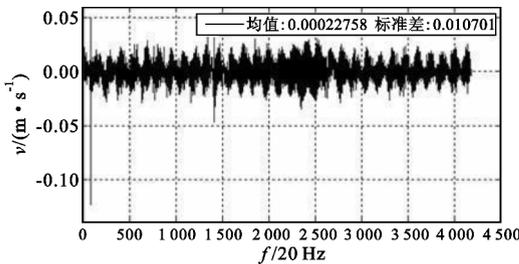
Fig. 4 Illustration of synchronization modification model

3.3.1 积分点修正

对于积分点的修正应根据不同数据采样机理而定, 以积分前点再采样为例, 如图 4(a) 所示, 如 $T_0 \sim T_2$ 区间飞行目标为匀加速运动, 则理论上 V_1' 应为 $T_1 \sim T_2$ 间的平均速度。依据统计学理论, 抽取某次试验的特征段数据, 对 $T_0 \sim T_2$ 区间的 3 个采样数据依据 $F = (V_0 + V_2) / 2 - V_1$ 模型进行分布统计检验。如图 5(a) 概率分布曲线所示, 在 2 mm 精度要求条件下, $F = (V_0 + V_2) / 2 - V_1$ 可以认为是服从标准正态分布的。如图 5(b) 所示, 统计均值为 0.000 23 ≈ 0 , 标准差为 0.01。



(a) 概率分布



(b) 误差统计

图 5 F 分布概率曲线图

Fig. 5 F-distribution probability curve

因此,可假定在 $T_0 \sim T_2$ 间飞行目标为匀加速运动,即 $V1' \approx (V1' + V2')/2$, 近似误差小于 0.23 mm/s , 满足精度要求,则修正后 T_1 时刻的真实速度为

$$V'_{T_1} = V1' - a \frac{T}{2} \quad (3)$$

式中, $V1'$ 为 $T_0 \sim T_2$ 区间的平均速度, T 为采样周期, a 为图 4(b) 中 $T_0 \sim T_2$ 区间内的平均加速度。

$$a = (a_1 + a_2) / 2 = [(V2' - V1') + (V1' - V0')] / 2T = (V2' - V0') / T$$

同理,可导出积分后点或未再采样的速度修正公式:

$$\begin{cases} V'_{T_1} = V1' - a \frac{T}{2}, T \text{ 为采样周期, 积分前点} \\ V'_{T_1} = V1' + a \frac{T}{2}, T \text{ 为采样周期, 积分后点} \\ V'_{T_1} = V1', T \text{ 为采样周期, 未进行再采样} \end{cases} \quad (4)$$

3.3.2 电波传播延迟修正

如图 4(b) 所示,以 B 点为修正点,设定 B 点所采样数据为 $(T_1: V1'')$, 依据前述电波传播延迟模型原理,则

$$V''_{T_1} = V1'' + a \frac{R}{C} \quad (5)$$

式中, a 为图 4(b) 中 A 至 C 点 $(T_0 \sim T_2)$ 间的平均

加速度。

$$a = (a_1 + a_2) / 2 = [(V2'' - V1'') + (V1'' - V0'')] / 2T = (V2'' - V0'') / 2T$$

式中, R 为 T_1 时刻的径向距离, C 为近似光速。

3.3.3 修正模型公式

依据公式(4)、(5),可得到包括积分点、路径传播延迟两项误差完整的时间不同步修正模式公式:

$$\begin{cases} V_{T_1} = V1 - a \frac{T}{2} + a \frac{R}{C}, T \text{ 为采样周期, 积分前点} \\ V_{T_1} = V1 + a \frac{T}{2} + a \frac{R}{C}, T \text{ 为采样周期, 积分后点} \\ V_{T_1} = V1 + a \frac{R}{C}, T \text{ 为采样周期, 未进行再采样} \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_{T_1} 为修正后的速度数据, $V1$ 为采样速度数据, a 为连续 3 点采样区间 $(T_0 \sim T_2)$ 平均加速度, T 为采样周期, R 为采样距离数据, C 为近似光速。

4 工程应用及结果分析

依据上述测速元同步误差修正模式公式(6),对图 1 所示的 $80 \sim 240 \text{ s}$ 试验数据首先完成了传播延迟和积分点修正,数据频率为 20 Hz 。修正完成后,进行了融合弹道再处理,并与修正后的测量数据进行一次差处理。表 1 所示为修正前后的误差统计比较结果,图 6 所示为修正后的一次差曲线。可见,在完成了同步误差修正后,测速误差改善约 $4 \sim 5$ 倍,测量数据与融合弹道的系统偏差尤其是在级间段 140 s 、 180 s 前后改善显著,最大偏差小于 0.04 m/s 。

表 1 不同步修正模型测速误差比较表

Table 1 Comparison of velocity error among different synchronization modification models

统计段落/s	修正前误差 /(m·s ⁻¹)	修正后误差 /(m·s ⁻¹)
80 ~ 120	-0.035	0.008
200 ~ 240	-0.087	0.023

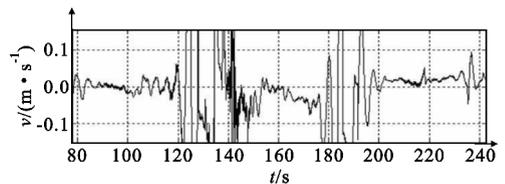


图 6 典型不同步误差修正后的测速偏差曲线图
Fig. 6 Typical curve of velocity offset after modification

依据表 1 与图 6 所示结果数据,显然在测速精

度要求 0.05 m/s 的条件下,经过时间不同步修正后的测量数据已经完全满足试验要求。而对于该 $80\sim 240\text{ s}$ 的特征段数据,级间段 140 s 、 180 s 的瞬间加速度达到 80 m/s^2 ,已经远远超出常规飞行器的加速度性能。因此,在常规基线条件下,经过上述两项时间不同步误差的修正后,可以满足处理精度要求。但是,依据图6所示结果,在级间段 140 s 、 180 s 处仍存在一定的偏差现象。按照级间段的最大偏差 0.04 m/s 、加速度 80 m/s^2 计算,时间不同偏差约为 0.5 ms ,即该段落仍有约 0.5 ms 的时间不同步差未消除。对于更高精度的测量要求,如加速度 50 m/s^2 、测速精度 0.01 m/s 的条件下,时间不同步误差则至少应优于 0.2 ms ,对于 0.5 ms 的不同步误差就必须考虑予以减小甚至是彻底消除。

5 结束语

基于多体制、多台套,甚至是光学与无线电联合测量设备的融合弹道处理是一项复杂的系统工程。随着我国航天测控技术的不断进步,影响弹道处理精度的各类因素也在不断变化。本文所述的融合弹道处理过程中的时间不同步误差与传统意义上的时间不同步误差概念有所区别,是涵盖了数据采集传输、测量体制等因素的时间同步概念。

工程实践表明,对于陆基测量系统,在长基线测量的数据融合过程中,时间不同步的影响因素复杂、显著,必须依据不同的试验要求进行适当的消除。本文所述的积分点和传播延迟两项时间不同步误差修正结果已达到 0.5 ms ,对于 0.05 m/s 测量精度要求是适用的,已作为常规方法应用于高动态飞行器的事后数据融合处理工作中。但对于更高精度的试验需求,如 0.5 ms 以下的时间不同步误差,则需要在工程实践中进一步研究探索,可以考虑的进一步消除措施包括压缩积分点间隔、提高测距精度、择优选取短基线设备数据融合等。同时,由于该方法所针对的时间不同步机理模型也适用于距离、角度测量模式,因此也可推广至测距、测角元素的不同步处理。

参考文献:

[1] 柴敏,余慧,宋卫红,等. 光学无线电测量信息融合定位方法[J]. 光学学报,2012,32(12):54-56.

CHAI Min, YU Hui, SONG Wei-hong, et al. Joint Positioning Method for Data Fusion of Photo-Electric Theodolite and Radar[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 32(12):54-56. (in Chinese)

- [2] 崔书华,宋卫红. 测速系统测量数据融合算法研究及应用[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(5):161-166.
CUI Shu-hua, SONG Wei-hong. The Research and Application of Data Fusion Algorithm in Measurement Data Processing of Velocity Measurement System[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(5):161-166. (in Chinese)
- [3] 贾兴泉. 连续波雷达数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2005:108.
JIA Xing-quan. Continuous-Wave Radar Data Processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 108. (in Chinese)
- [4] 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,2010:8-10.
SHI Zhang-song, LIU Zhong. Method and Theory of Target Tracking and Data Fusion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010:8-10. (in Chinese)
- [5] 刘利升,吴斌. 外弹道测量精度分析与评定[M]. 北京:国防工业出版社,2010:260-261.
LIU Li-sheng, WU Bin. Accuracy Analysis and Evaluation for Exterior Ballistic Measurement [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010:250-261. (in Chinese)

作者简介:



李增有(1976—),男,吉林白山人,1999年于东北大学获工学学士学位,2006年于大连理工大学获工学硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为无线电测控技术;

LI Zeng-you was born in Baishan, Jilin Province, in 1976. He received the B. S. degree from Northeastern University and the M. S. degree from Dalian University of Technology in 1999 and 2006, respectively. He is now a senior engineer. His research concerns radio TT&C.

Email:li_zeng_you@163.com

戴由旺(1979—),男,江西铜鼓人,2001年于国防科技大学获工学学士学位,2009年于大连理工大学获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为无线电测控技术。

DAI You-wang was born in Tonggu, Jiangxi Province, in 1979. He received the B. S. degree from National University of Defense Technology and the M. S. degree from Dalian University of Technology in 2001 and 2009, respectively. He is now an engineer. His research concerns radio TT&C.