

分段曲线拟合在同步距离后置处理中的应用

马徐琨, 邹 冰

(昆明船舶设备试验中心, 昆明 650051)

摘要: 曲线拟合是运动目标轨迹后置处理的重要方法之一。对于经过预处理后的测量数据采用多项式曲线拟合进行平滑处理, 阶数选取较高时, 拟合效果较好, 但方程求解复杂, 拟合曲线稳定性变差。文章对多项式曲线拟合方法用于同步测量距离后置处理进行了分析, 针对机动目标距离数据特点提出分段曲线拟合方法。实测数据处理结果表明, 该方法能有效地解决拟合效果和多项式阶数之间的矛盾。

关键词: 分段曲线拟合; 后置处理; 多项式; 拟合效果

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)03-0159-04

Application of piece-wise curve fitting to post-processing of synchronous distances

MA Xu-kun, ZOU Bing

(Kunming Shipborne Equipment Research and Test Center, Kunming 650051, China)

Abstract: Curve fitting is an important method in post-processing for tracking moving targets. Using high-order polynomial curve fitting to smooth pre-processed measurement data can provide good results, but will increase processing complexity and even cause instability. This paper applies polynomial curve fitting to the post-processing of synchronously measured distance data, and presents a piece-wise curve fitting technique in accordance with the characteristics of distance data for maneuvering underwater targets. Results based on practical measurements show that the proposed technique can effectively resolve the conflict between fitting effects and the polynomial order.

Key words: subsection curve fitting; pre-process; polynomial; fitting effect

1 引 言

同步式距离测量方法的原理是声发射设备发射的同步声信号传播到接收基元, 由接收设备估计出声信号传播时延后, 乘以声速来得到距离。短基线同步式水声定位系统就是利用各阵元测量得到的距离, 经几何计算估算出运动目标的轨迹。

由于受接收信噪比和各种随机因素的影响, 各阵元所测时延值因有干扰噪声的影响而有起伏, 且还有许多野值。在距离估算时虽经实时“距离处理软件”的处理, 但很难做到在保留全部有用信号的同时, 又将干扰和野值全部剔除。故从这些测量数据得到的

目标运动轨迹, 往往带有一定的随机误差和部分野点。要获得精确的目标运动轨迹, 就需对各阵元测量的这些含有野值和干扰的数据进行处理。

数据拟合(或数据平滑)是一种重要的数据处理方法, 也是运动目标轨迹事后处理的方法之一。水下运动目标轨迹数据处理, 其目的是最大限度地恢复信号和去除噪声及干扰。理论指出, 数据拟合中有两个重要的共性问题, 一是函数类及其函数的选取, 它决定了是否能准确恢复信号; 二是判据和算法的选择, 它影响着去除各种噪声和干扰的效果。

多项式曲线拟合方法是较常用的一种数据处理方法, 用多项式曲线拟合方法平滑同步测量距离存在的主要问题是多项式阶数的选取。特别对于强机动目标阶数选择较低时拟合精度和效果均不理想, 阶数选取较大时拟合精度和效果较理想, 但阶数较高时又带来以下问题:

(1) 正规方程求解较复杂;

收稿日期: 2003-06-25; 修回日期: 2003-10-20

作者简介: 马徐琨(1965), 男, 高级工程师, 工学硕士学位, 现从事水声技术应用和试验工作。

(2) 阶数大于 7 时, 正规方程组往往是病态的^[1];

(3) 拟合曲线稳健性变差, 受随机起伏影响变大。

实际数据处理中较难完全兼顾, 须根据需要折中选择。

为了避免解病态方程组带来的麻烦, 可用改变函数类 Φ 的基函数的方法, 来改善方程组的状态, 但可能使正规方程求解更为复杂, 拟合曲线的稳健性也会随着阶数的提高变差。为了有效地解决这个问题, 可采用分段曲线拟合的方法。

运动目标轨迹的处理, 可直接对目标轨迹进行处理, 也可以通过对测量阵各阵元距离数据进行处理, 来实现对目标轨迹处理。本文主要对单一阵元同步距离测量数据进行处理。

2 野值剔除

对原始数据进行后置处理, 无论是采用曲线拟合还是卡尔曼滤波, 对于零均值白噪声背景一般均能获得较理想的平滑效果, 但野值的存在会影响处理效果。所谓“野值”是指那些由测量仪器精度以外因素引起的不正确测量或计算结果。其特点是与正常值相差很大, 而且一般不符合统计规律。

通过对测量数据进行分析不难发现, 野值可分为两类:

- (1) 远距离时, 信噪比不够造成的不正确测量值;
- (2) 满足信噪比要求时受各种干扰产生的不正确测量值。此类野值又有零星野值和成片野值两种。

前一类野值在后置处理中无论采用何种方法均较难剔除, 后一类野值我们采用门限检测的方法加以处理, 并用内插方法补上相对合理的估计值; 对于局部测量无效的数据段(在该时间内测量设备受干扰未能测量到信号), 可依据段首和段末测量数据进行内插处理。文献[2]中较详细地介绍了野值剔除方法。

3 多项式最小二乘曲线拟合

曲线拟合就是根据 N 个给定的点 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$) 求一条近似曲线, 即依据某一确定的函数类 Φ 寻找一个最好的函数 $\varphi(x)$ 来拟合已给的数据 (x_i, y_i) 。最小二乘曲线拟合就是要求函数 $\varphi(x_i)$ 与数据 y_i 的偏差 $y_i - \varphi(x_i)$ 的平方和(见式(1))

为最小。

$$\sum_{i=1}^N [y_i - \varphi(x_i)]^2 \tag{1}$$

问题更一般的提法是: 对于给定的数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$), 选取线性无关的函数族 $\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ 及权函数 $\omega(x)$, 要求在函数类 $\Phi = \text{Span}\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ 中寻找一个函数 $\varphi^*(x) = a_0^* \varphi_0 + a_1^* \varphi_1 + \dots + a_m^* \varphi_m$ ($m < N$), 使变量 a_0, a_1, \dots, a_m 的二次函数(见式(2))达到最小。

$$I(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^N \omega(x_i) [y_i - \sum_{k=0}^m a_k \varphi_k(x_i)]^2 \tag{2}$$

由多元函数极值的必要条件, 有

$$\frac{1}{2} \frac{\partial I}{\partial a_j} = \sum_{i=1}^N \omega(x_i) \varphi_j(x_i) [y_i - \sum_{k=0}^m a_k \varphi_k(x_i)] = 0 \tag{3}$$

$(j = 0, 1, \dots, m)$

多项式最小二乘曲线拟合就是取代数多项式 $\{1, x, \dots, x^m\}$ 为基函数, 相应的正规方程组就是

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N x_i & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^m \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_i^m & \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} & \dots & \sum_{i=1}^N x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_i^m y_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

只要求出正规方程组的解 a_0, a_1, \dots, a_m , 就可得到拟合多项式:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m \tag{5}$$

代数多项式阶数 m 的选取对拟合精度及效果影响很大, 在实际选取中主要是依据测量目标机动情况而定。比如单阵元测量的 $R-T$ 曲线为一条抛物线时, 多项式阶数 $m < 7$ 就可获得较为理想的平滑效果。

4 分段多项式曲线拟合

对于强机动目标距离测量数据, 要获得较好的拟合效果必须提高多项式阶数, 这样就会带来引言中所述问题, 通过分析单阵元测量的 $R-T$ 曲线, 可以看出其具有正弦函数的特征, 为此可采用本文提出的分段多项式拟合的方法。

该方法将 N 个测量数据点 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$) 分成若干个小的区间, 在每个小区间上采用低次多项式进行拟合。区间的划分主要根据目标机

动情况而定。如直航运动的目标, 单个水听器测量得到的 $R-T$ 曲线为一条抛物线, 则可将测量数据分为两个区间, 分段节点选在抛物线 ($R-T$ 曲线) 的顶点处。

假设有 N 个测量数据点 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, N)$, 共分为 L 段, 则有:

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$$

取代数多项式 $\{1, x, \dots, x^m\}$ 为基函数, 相应的正规方程组就是:

$$\begin{cases} G_{1n_1} A_{1n_1} = d_{1n_1} \\ G_{2n_2} A_{2n_2} = d_{2n_2} \\ \vdots \\ G_{kn_L} A_{kn_L} = d_{kn_L} \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$d_{kn_L} = \left[\sum_{i=1}^{n_L} y_i \quad \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki} y_i \quad \dots \quad \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^m y_i \right]^T$$

$$A_{kn_L} = [a_{k0} \quad a_{k1} \quad \dots \quad a_{kn_L}]^T$$

$$G_{kn_L} = \begin{bmatrix} N_L & \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki} & \dots & \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^m \\ \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki} & \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^2 & \dots & \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^m & \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^{m+1} & \dots & \sum_{i=1}^{n_L} x_{ki}^{2m} \end{bmatrix}$$

通过求解式 (6) 可获得 L 组拟合多项式, 并分别对 L 组数据进行拟合, 从而实现对整个测量数据的平滑处理。

5 试验数据处理

把前面介绍的测量数据野值剔除和多项式数据拟合方法结合起来, 就可以完成试验数据的平滑处理, 其处理框图如图 1 所示。

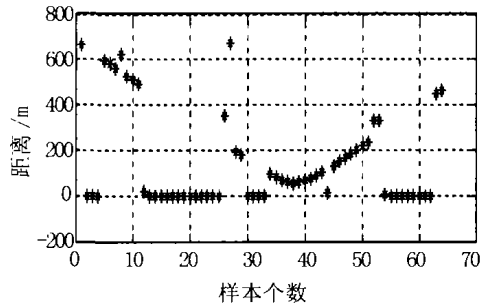


图 1 数据平滑处理系统组成框图

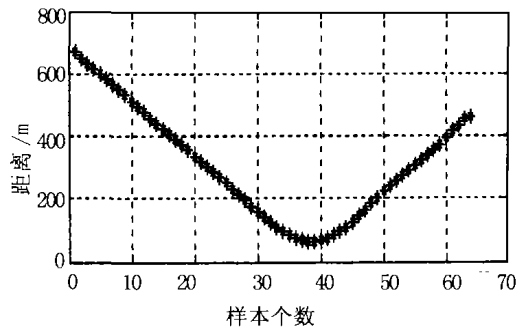
按上述方法编写的水下运动目标单阵元同步距离平滑处理软件, 用于对实测数据的处理, 可有效地完成距离测量值的平滑处理。图 2 给出了某次测量数据处理前后的对比情况。实验数据参数为: 同步测距周期

为 1s, 声速为 1480 m/s, 拟合多项式阶数为 10 阶。

由图 2 见, 原始测量值 $R-T$ 曲线有较多野值点, 也有一定的起伏, 在进行野值剔除并选取较高的拟合阶数 (大于 7 阶) 平滑处理后, 不但剔除了全部野值, 而且估计方差大大减小, $R-T$ 曲线有明显改善。



(a) 平滑处理前的时间-距离值



(b) 平滑处理后的时间-距离值

图 2 平滑处理前后结果对比

图 3、图 4 分别给出 2 阶和 10 阶多项式对同一组实测数据的拟合曲线。可以看出, 阶数选则较低时拟合精度和效果均不理想。

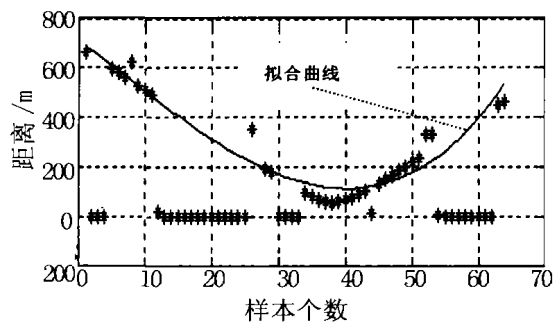


图 3 2 阶多项式平滑处理结果与原始测量值对比图

图 5 和图 6 给出了分段 3 阶多项式与 3 阶多项式拟合效果对比, 可以看出分段多项式拟合方法, 在拟合多项式阶数较低时仍能获得较理想的拟合效果。该方法有效地解决了多项式拟合阶数同拟合效果之间的矛盾。

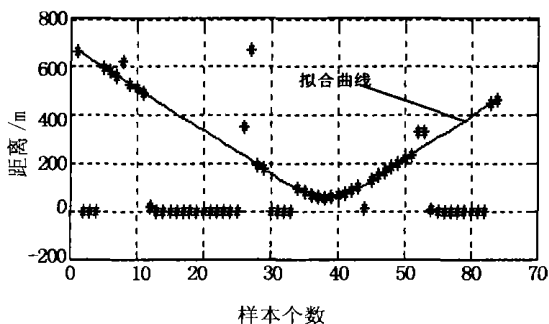


图4 10阶多项式平滑处理结果与原始测量值对比图

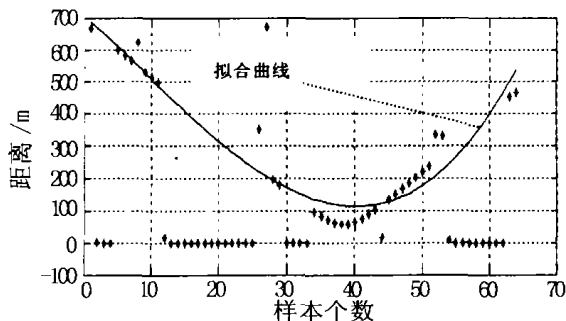


图5 3阶多项式平滑处理结束与原始测量值对比图

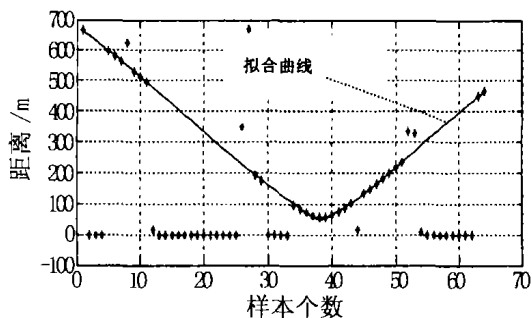


图6 分段3阶多项式平滑处理结束与原始测量值对比图

6 结束语

对测量数据进行平滑处理以改善测量效果,一直是实际工程中不断进行研究的内容之一。本文结合单阵元测量的同步距离 $R-T$ 曲线具有正弦函数变化的特征,提出采用分段多项式拟合的方法,在保证拟合效果的基础上降低了多项式拟合阶数,避免了求解复杂正规方程和病态方程的问题,实际测量数据处理结果说明,该方法能有效地解决拟合效果和多项式阶数之间的矛盾。

应指出的是,对实际测量数据的拟合,野值剔除是十分重要的环节,无论后置处理采用何种处理方法,不能有效剔除测量数据中的野值均较难得到理想的处理效果。

参 考 文 献

- [1] 吴国清. 水下被动测量距离的后置处理[J]. 声学学报, 1995, 20(2): 88-100.
- [2] 丁育中. 短基线水下声定位系统后置处理[J]. 声学 & 电子工程, 1990, 19(3): 13-20.
- [3] 聂铁军. 数值计算方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990. 67-86.

(上接第 149 页)

7 结束语

文中介绍了某型声纳基阵信号模拟器实时多任务软件的设计与开发过程,该系统已经研制成功,在实际工程应用中不仅验证了其实时和稳定的性能,而且为声纳处理设备提供了非常好的仿真结果,取得了一定的实际效益。

参 考 文 献

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版

社, 2002. 409-419.

- [2] 陈国良. 并行计算-结构、算法、编程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 164-177.
- [3] 何心怡. 一种声纳模拟器并行多处理系统的设计与应用[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26(3): 341-344.
- [4] 苏涛. 高性能数字信号处理器与高速实时信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. 46-66.