

## 二级 Kalman 滤波的被动声定位后置处理方法

马驰州<sup>†</sup> 杨亦春

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

**摘要** 阵列定位的计算结果中往往存在大量的野值,需要用后置处理方法从结果中选取真实目标信息。本文提出了一种基于 Kalman 滤波的二级后置处理方法,建立了相应的滤波模型,并对主要参数进行讨论选取,同时给出了外场实验结果。结果表明此方法后置处理效果明显,并可以满足系统实时性的要求。

**关键词** 被动声定位, 后置处理, 卡尔曼滤波

### A post processing method of passive acoustic localization based on two-step Kalman filter

MA Chi-Zhou YANG Yi-Chun

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

**Abstract** Post processing is necessary for the use of acoustic array to track the true source and reduce errors. This paper presents a two-step Kalman filter, post processing method in passive acoustic localization, gives the relevant filter model and discusses selection of its main parameters. Field-test's results show that this method performs well and is suitable for real-time passive localization.

**Key words** Passive acoustic localization, Post processing, Kalman filter

#### 1 引言

被动声阵列定位是利用传声器阵列接收目标声信号,经信号处理提取声源的空间信息,以确定目标方位及距离的一种定位技术。如何有效地获得更高的定位精度始终是被动声定位研究的焦点,后置处理技术是一种有效的提高定位精度的方法, Kalman 滤波是常用的后置处理手段<sup>[3]</sup>,在国内外研究中也采用<sup>[4]</sup>,

并取得了相当好的效果。

Kalman 滤波由美籍匈牙利数学家卡尔曼(R. E. kalman)于 1960 年提出的。由于其对硬件要求不高、运算量不是很大,以及其在机动目标跟踪系统中独特的优点,越来越受到人们的青睐,并广泛地应用于空间、航空、航海等领域。其在被动声定位方面的应用也很多<sup>[4-6]</sup>,但大多数的应用都只是对目标最终的运动轨迹或是目标的运动参数进行估计滤波,而忽略了

2006-05-08 收稿; 2006-12-20 定稿

作者简介: 马驰州 (1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理。

杨亦春 (1966-), 男, 研究员。

<sup>†</sup> 通讯联系人 E-mail: machizhou@mail.ioa.ac.cn

对定位计算中一些关键数据的滤波, 比如时延量等。基于此, 本文结合地面小基阵对空中运动声源的定位研究, 提出了一种二级 Kalman 滤波的后处理方法, 更有效地提高了对直升机目标的定位精度。

文章结构如下: 第 2 部分简单介绍基于时延估计被动声定位的理论; 第 3 部分分析后置处理的必要性; 第 4 部分详述了二级 Kalman 滤波后置处理方法的原理及主要参数的选取; 第 5 部分给出了对外场实验数据进行处理的结果; 最后给出结论。

## 2 被动声定位理论

基于时延估计的被动声定位方法主要是利用声源到达不同传声器的时间差, 再根据传声器间的几何关系来确定目标的方位以及距离。根据系统的不同要求, 阵列的形状以及传声器的数量存在着很大的差异, 然而其基本定位理论却是大体相同的。为简单起见, 本文仅以三元线阵为例来简单地介绍被动声定位原理。

图 1 所示为简单三元线阵模型, 图中  $S$  为声源,  $M_1, M_2, M_3$  为三个传声器, 传声器的间距为  $d$ 。设  $SM_1 = R_1, SM_2 = R, SM_3 = R_3$ , 其中  $R$  为待测的距离。利用时延估计的方法可以得到声信号到达  $M_1, M_2$  的时延差  $\tau_{12}$ , 以及到达  $M_3, M_2$  的时延差  $\tau_{32}$ , 按图 1 所示的坐标可建立如下方程组:

$$\begin{cases} c\tau_{12} = R_1 - R = \sqrt{R^2 + d^2 - 2dR\cos\varphi} - R \\ c\tau_{32} = R_3 - R = \sqrt{R^2 + d^2 + 2dR\cos\varphi} - R \end{cases} \quad (1)$$

解此方程组可得:

$$\begin{cases} \cos\varphi = \frac{c(\tau_{32} - \tau_{12})}{2d} \\ R = \frac{d^2 \sin^2\varphi}{c(\tau_{12} + \tau_{32})} \end{cases} \quad (2)$$

从式 (2) 可以看到, 定位的精度与时延估计的精度以及阵列的孔径有关。在孔径大小确定的情况下, 定位的精度往往主要由时延的精度

决定。提高时延精度可以从两个方面来实现: 一是采取精度高的时延估计方法; 二是对时延进行适当的处理。本文的主要工作集中在对时延曲线的后置处理上。具体的处理方法见第 4 部分。

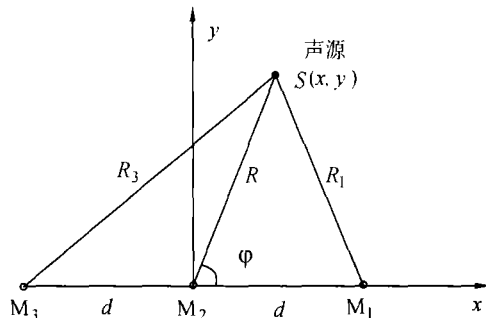


图 1 三元线阵定位模型

## 3 被动声定位后置处理的必要性

时延估计是被动声定位中最关键的技术, 时延估计的精度直接影响着系统定位性能的好坏。时延估计的研究已经进行了许多年, 取得了相当成功的进展<sup>[1,2]</sup>, 大多数时延估计的精度可接近于 Cramere-Rao 下界。然而在外场实验中, 由于受到复杂外界环境的干扰 (主要包括风的影响、周围物体的反射以及背景噪声), 实测的时延量存在着很大的误差, 严重影响着定位的精度。

图 2 是外场环境实测得的时延曲线, (a) 为较理想环境下测得的曲线, (b) 为存在强干扰和存在传声器误差情况下测得的曲线。对比可以看出, 在信噪比较高的情况下, 时延的变化趋势很明显, 且曲线比较光滑; 而在强干扰的情况下, 时延曲线存在着大量的跳变, 时延变化规律不明显, 这种跳变不经处理将给后续的定位计算带来很大的误差, 严重时根本无法定位。由此可见, 对时延后处理是很有必要的。

经过后置处理以后的时延虽然较处理前在精度上有很大的提高, 但仍然存在着一一定的误

差，进而仍会对最终定位结果造成影响；另外定位计算过程中，孔径误差等其它因素，也会影响到最终的定位结果，会使定位结果不准确。因此，对最终定位结果进行适当的滤波也是很有必要的。

### 4 二级 Kalman 滤波后置处理

从第 3 部分的分析中可以看到，为了提高定位的精度，对时延以及最终定位结果分别滤波是很有必要的，因此本文提出了二级 Kalman 滤波的处理方法。所谓二级滤波就是将后处理滤波器分为两个阶段完成，第一阶段对时延曲线进行处理；第二阶段对计算的方位角或距离进行处理。其中第一级对时延曲线的滤波尤为重要。二级滤波结构如图 3 所示。

#### 4.1 滤波模型

应用 Kalman 滤波的关键一步是建立系统的状态模型。在实际中有时很难获得对系统的精确描述，只能用近似模型来代替；另一方面，精确模型往往比较复杂，维数过高，因而计算量过大，对实时性要求较高的系统更是难以实现，因而在实际应用中常常对模型进行简化。

本系统中三个滤波器都采用类似的简化模型，以对时延量滤波为例，具体模型描述如下：

状态方程

$$x(k) = Ax(k - 1) + w(k - 1) \tag{3}$$

测量方程

$$z(k) = Hx(k) + v(k) \tag{4}$$

式中：

$$x(k) = [\tau_d(k), \dot{\tau}_d(k)]^T \text{ 为动态状态向量，其}$$

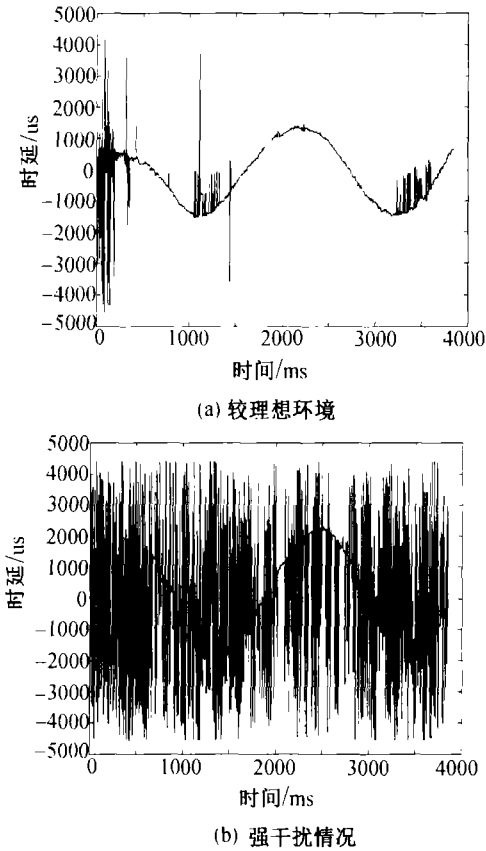


图 2 外场环境对时延的影响

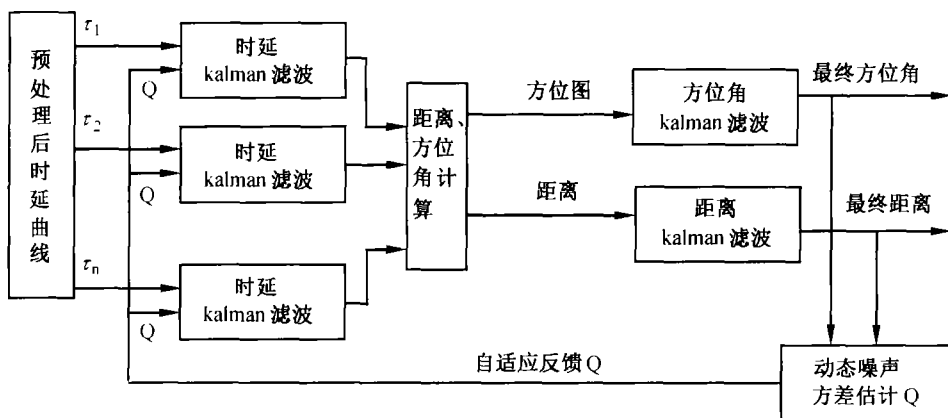


图 3 二级滤波结构图

中  $\tau(k)$  为时延量,  $\dot{\tau}_d(k)$  为时延变化率;  $A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  为转移矩阵, 其中  $\Delta T$  为两相邻时延间隔;

$w(k-1)$  为运动噪声向量,  $z(k) = \tau_d(k)$  为测量值向量;

$H = [1, 0]$  为测量矩阵,  $v(k)$  为测量噪声向量。

## 4.2 主要参数选取

选取合适的参数是十分重要的。参数的选择愈接近实际情况, 则卡尔曼滤波性能越好, 下面将分别对本系统中几个主要参数进行讨论:

### (1) 初始值的设定

初始值是 Kalman 滤波器的起始参考数值, 它的误差将直接影响到滤波器的收敛速度, 误差越大, 滤波器的收敛速度就越慢, 为了使滤波器具有较快的收敛速度应使初始值尽可能地准确, 所以在实际系统中启动滤波器前, 先预算一段时延量, 将这段时延量的均值赋给  $\tau_d(0)$ , 这样可以很大程度地降低初始值的误差; 同样, 初始方差矩阵也用预算的时延量来进行估计。

### (2) 运动噪声方差 $Q$ 值的选取

运动噪声方差  $Q$  值的选取最为重要。  $Q$  值选取的好坏对滤波精度有着直接的影响, 动态模型越是不精确,  $Q$  值的影响也就越大。选取  $Q$  值的一个基本原则是: 使  $Q$  的大小与动态模型的精度相匹配。

关于  $Q$  值的选取, 对一般的动态系统而言, 如果目标的机动情况不是很大的话, 可取为常数, 而此常数值往往都是通过事先的模拟计算确定的。而在目标机动的情况下, 可以通过自适应的方法随着现场情况的变化来动态的选择。由于本系统目标处于不断的运动中, 外界环境也不断地变化, 所以利用自适应的方法去估计运动噪声方差是可行的。

通过对实验数据的分析得知, 运动噪声的方差与目标的距离有一定的对应关系, 即目标距离越远, 运动噪声的方差将越小; 反之, 则越

大。因此根据目标距离的不同可选择如下值:

$$Q = \begin{cases} 10^{-5} & R \leq 1.5\text{km} \\ 10^{-7} & 1.5\text{km} < R \leq 3.5\text{km} \\ 10^{-8} & 3.5\text{km} < R \leq 5\text{km} \\ 10^{-9} & R > 5\text{km} \end{cases} \quad (5)$$

### (3) 测量噪声方差 $R$ 值的选取

测量噪声方差同样也是一个重要的参数, 本系统利用残差量作为参照进行选取。所谓残差量就是测量值与估计值之差, 定义如下:

$$\nabla y_k = y_k - Hx_k^- \quad (6)$$

式中:

$\Delta y_k$  为第  $k$  步的残差量;

$y_k$  为第  $k$  步的测量值;

$Hx_k^-$  为第  $k$  步的估计值。

从式 (6) 可以看出, 残差量不仅含有测量值和估计值的信息, 而且还可以反映出测量值与估计值之间存在的差异。通过反复地实验证明, 可以利用残差量作为参照来选取合适的测量噪声方差  $R$ 。具体选取方法如下:

$$R = \begin{cases} 10^{-6} & \Delta y_k < K_1 \\ 10^{-4} & K_1 < \Delta y_k < K_2 \\ 10^{-2} & \Delta y_k > K_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $K_1, K_2$  为两个门限, 门限的大小可以按照实际情况确定, 当目标作近距离运动时, 信噪比较高, 门限值可以取得小一些; 当目标作远距离运动时, 门限值可以取的大一些。

## 4.3 Kalman 滤波流程

图 4 是 Kalman 滤波递推流程图, 具体步骤说明如下:

(1) 启动, 设置运动状态的初始值及初始方差;

(2) 一步状态预测  $\hat{x}(k/k-1) = A\hat{x}(k-1)$ ;

(3) 预估观测量  $\hat{z}(k/k-1) = H\hat{x}(k/k-1)$ ;

(4) 验前方差 (一步估计误差的方差)  $P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$ ;

(5) 滤波增益  $K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$ ;

(6) 卡尔曼滤波  $\hat{x}(k) = \hat{x}(k/k - 1) + K_k(z(k) - \hat{z}(k/k - 1))$ ;

(7) 验后方差 (滤波误差的方差)  $P_k = (I - K_k H)P_k^-$  .

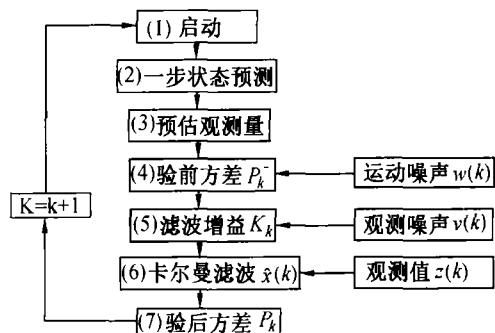


图 4 卡尔曼滤波递推流程图

## 5 外场实验处理结果

### 5.1 滤波法与平均法性能对比

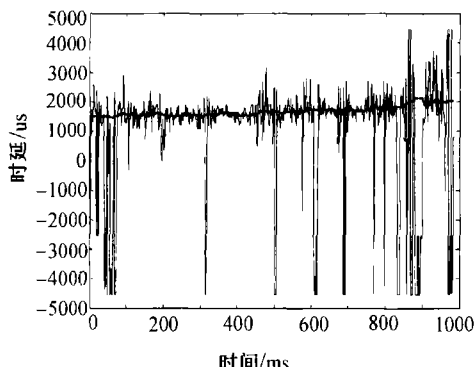
在工程中，为了滤去数据中的一些起伏或是跳变的数值，人们最常用的方法是对数据取平均值。下面将利用外场实验数据对平均法与滤波法作一对比。

图 5 中，(a) 为 Kalman 滤波结果，(b) 为平均处理结果，其中细线为原始数据，粗线为处理后的曲线。可以看出，Kalman 滤波的方法可以有效地避开野值的影响，处理的结果比较平滑；而平均法严重地受到野值的影响，从而使处理结果存在着较大的起伏。对比可知，Kalman 滤波在后置处理方面较平均法具有更优越的性能。

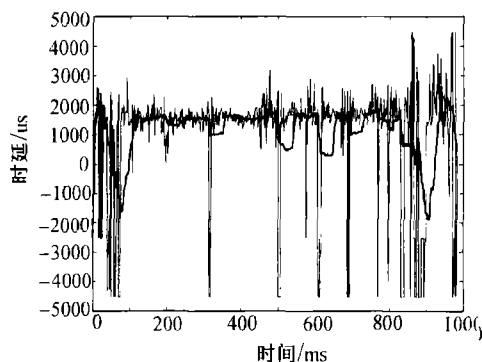
### 5.2 外场实验数据处理结果

图 6 是卡尔曼滤波对时延数据处理结果，细线为原始数据，粗实线为处理结果，从图中可以看到，卡尔曼滤波可以很好地滤去时延曲线中大的跳变，使曲线更加平滑。

图 7 为二级滤波处理最终结果，实验中目标在测点上方绕飞，左图是目标的方位角，右图是目标的仰角，从最终的结果可以看到，目标方位角从 0 到 360 度之间连续变化，目标仰

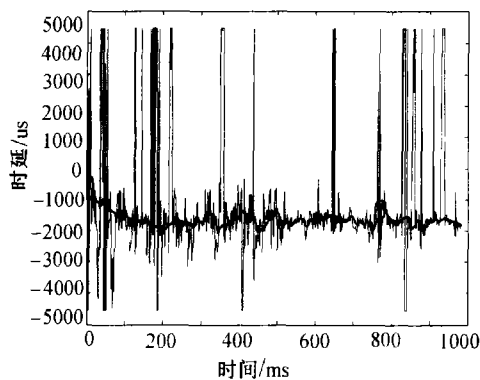


(a) 卡尔曼滤波结果

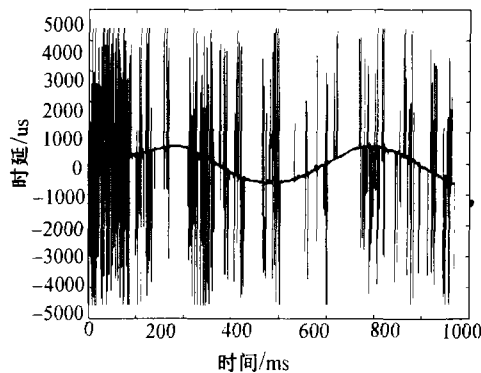


(b) 平均处理结果

图 5 卡尔曼滤波与平均法效果对比



(a) 目标直线飞行



(b) 目标绕飞

图 6 时延后处理结果

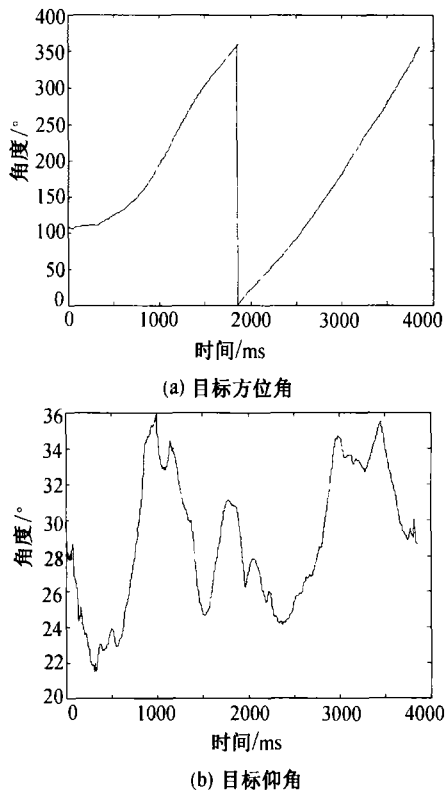


图7 二级滤波后处理结果

角在 28 度左右小范围内跳动, 基本反映了目

标的运动状态。

## 6 结论

本文在分析影响定位精度因素的基础上, 提出了对时延以及最终定位结果分别进行滤波的二级滤波后置处理方法, 建立了相应的滤波模型, 并对主要滤波参数进行讨论选取。此方法软硬件两方面都较容易实现。外场实验结果表明, 该方法在性能上优于常用的平均法, 且满足系统实时性的要求, 具有较强的实用性。

## 参 考 文 献

- [1] 杨亦春, 马驰州, 李晓东等. 声学学报, 2003, 28(2): 159-166.
- [2] 杨亦春, 李晓东, 田静. 应用声学, 2002, 21(16): 1-7.
- [3] Greg Welch, Gary Bishop. UNC-Chapel Hill, TR, 2002, 3: 95-041.
- [4] Wu Guoqing. Chinese Journal of Acoustics, 1995, 3(2): 88-100.
- [5] N. H. Gholson, R. L. Moose. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 13(3): 310-317.
- [6] 吴国清. 声学学报, 1995, 20(2): 88-100.