

# 基于单站测量的纯仰角目标参数航迹滤波方法

刘进忙,李振兴,刘永兰,岳韶华,吴中林  
(空军工程大学防空反导学院,陕西 三原 713800)

**摘要:**根据特殊战场环境下传感器测量目标的不完全信息的情况,提出了空间目标纯仰角参数的处理思想,并给出了一种基于投影关系的参数航迹滤波方法,该方法基于斯特瓦尔特定理和总体最小二乘法,讨论了等高飞行目标的纯仰角处理形式和斜直线目标的纯仰角参数滤波形式。仿真验证了该方法能较好适应特殊战场环境下的不完全测量信息情况。

**关键词:**投影关系;纯仰角;不完全信息;参数航迹

**中图分类号:**TN953 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.022

## Algorithm to estimate the parametric trajectory of elevation-only target by single station observation data

LIU Jin-mang, LI Zhen-xing, LIU Yong-lan, YUE Shao-hua, WU Zhong-lin  
(Missile Inst. of Air Force Eng. Univ., Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** Aiming at the incomplete metrical information of target under special condition of battlefield, a novel processing idea with the elevation-only parameter is proposed, and a filtering algorithm of parametric trajectory of special target with projection rules is designed. By using Stewart Theorem and Total Least Square Algorithm, the elevation-only filter algorithm is discussed which is under the condition of constant altitude flight and diagonal line flight. The simulation results show that the new algorithm achieves a favorable filtering precision, which can be used under the special condition with incomplete metrical information.

**Key words:** projection rules; elevation-only; incomplete information; parametric trajectory

### 1 引言

在复杂干扰环境下,由于敌方的干扰和投放针对性设计的特殊目标,造成我方传感器有关目标的测量坐标会减少,常出现仅剩仰角序列或仰角信息可信度相对较高等问题。为充分利用各传感器的战场目标信息资源,实现灵活的组网,可利用静止单站测量的目标纯仰角信息来建立目标的参数航迹,实现目标参数航迹滤波和目标跟踪。因此为了较好地利用目标坐标的不完全信息,作者通过多年的理论与实践,总结出利用分坐标处理的思想来实现目标的有效跟踪<sup>[1-2]</sup>。在国内外已有较多的文献对纯方位、纯角度进行了研究<sup>[3-7]</sup>,但文献中未见纯仰角目标跟踪方面的报道。

本文采用设定飞行模型的方式,利用纯仰角序

列解算出航迹参数,利用航迹参数实现对某时刻目标仰角进行预测,以便实现目标纯仰角的有效跟踪。

### 2 等高直线目标的纯仰角跟踪原理

#### 2.1 目标等高匀速直线飞行模型

目标在远距离测量站的运动时可认为是匀速直线等高飞行,如图1所示。目标在水平面上等高 $h$ 沿直线匀速飞行,根据斯特瓦尔特(D. Stewart)定理,可得到目标高度与目标投影点到观测站的距离比关系,经整理有:

**基金项目:**陕西省自然科学基金项目(No. 2010JM8013);空军工程大学防空反导学院“研究生科技创新基金”课题(No. HX1112)资助。

**作者简介:**刘进忙(1958-),男,教授,博士生导师,研究方向为雷达组网信息处理,目标跟踪等。E-mail:liujinmangl@163.com

**收稿日期:**2012-04-19; **修订日期:**2012-05-09

$$\frac{V_1^2}{h^2} = \frac{\cot^2 \varepsilon_1}{(t_1 - t_2)(t_1 - t_3)} + \frac{\cot^2 \varepsilon_2}{(t_2 - t_1)(t_2 - t_3)} + \frac{\cot^2 \varepsilon_3}{(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)} \quad (1)$$

若等间隔观测目标,  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = T$ , 代入式(1)可得:

$$\frac{2V_1^2 T^2}{h^2} = \cot^2 \varepsilon_1 - 2\cot^2 \varepsilon_2 + \cot^2 \varepsilon_3 \quad (2)$$

目标匀速直线等高飞行仰角约束条件满足:

$$\cot^2 \varepsilon_1 - 3\cot^2 \varepsilon_2 + 3\cot^2 \varepsilon_3 - \cot^2 \varepsilon_4 = 0 \quad (3)$$

由式(2)可以看出,  $\cot^2 \varepsilon$  为采样点时刻  $T$  的二次多项式函数。

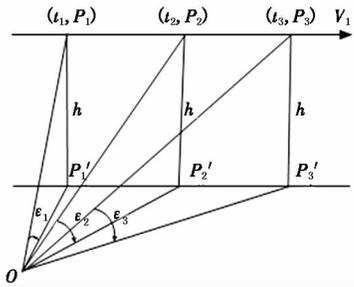


图1 空间目标匀速直线等高飞行示意图

## 2.2 目标等高匀加速直线飞行模型

设目标匀加速直线等高飞行, 如图1所示。若等间隔观测目标,  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = T$ , 加速度为  $a$ , 等时间间隔目标的飞行距离的关系:  $l_{34} - l_{23} = l_{23} - l_{12} = \Delta$ , 因此:  $l_{34} = l_{23} + \Delta, l_{12} = l_{23} - \Delta, \Delta = aT^2$ 。于是分别利用斯图瓦尔特(D. Stewart)定理得到两个方程并相减, 可得到:

$$\frac{6aT^2 l_{23}}{h^2} = \cot^2 \varepsilon_4 - 3\cot^2 \varepsilon_3 + 3\cot^2 \varepsilon_2 - \cot^2 \varepsilon_1 \quad (4)$$

同理有:

$$\frac{6a^2 T^4}{h^2} = \cot^2 \varepsilon_5 - 4\cot^2 \varepsilon_4 + 6\cot^2 \varepsilon_3 - 4\cot^2 \varepsilon_2 + \cot^2 \varepsilon_1 \quad (5)$$

由式(5)可见,  $\cot^2 \varepsilon$  为采样点时刻  $T$  的四次多项式函数。

## 3 空间直线目标的纯仰角跟踪原理

### 3.1 空间目标匀速直线飞行模型

如图2所示, 设目标观测站  $O$  与航迹直线的垂直点为  $P_{\perp}$ , 其距离为  $R_{\perp}$ ,  $P_{\perp}$  点与地面高度为  $h_{\perp}$ , 目标过航迹垂直点的时刻为  $t_{\perp}$ , 目标航线在水平面的投影直线与观测站的垂点距离为  $r_{\perp}$ , 其目标过该投影点的时刻为  $t'_{\perp}$ 。设目标在空间沿直线以匀速  $V$  直线航迹(俯仰角为  $\varepsilon_0$ )飞行, 设起始观测  $t_0$  (已知)时刻的目标高度为  $h_0$ ,  $t_i$  时刻目标在水平面上的高度为  $h_i$ , 其投影点与观测站的距离为  $r_i$ , 则有:

$$r_i = h_i \cot \varepsilon_i = [h_0 + V(t_i - t_0) \sin \varepsilon_0] \cot \varepsilon_i, i = 0, 1, \dots, n \quad (6)$$

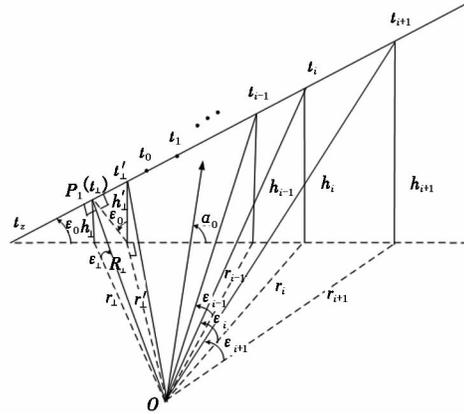


图2 空间目标匀速直线飞行示意图

设相邻三个时刻分别为:  $t_{i-1}, t_i, t_{i+1}$  其对应目标在水平面上的投影点与观测站的距离分别为:  $r_{i-1}, r_i, r_{i+1}$  满足 D. Stewart 定理并约简:

$$(t_{i+1} - t_i)r_{i-1}^2 - (t_{i+1} - t_{i-1})r_i^2 + (t_i - t_{i-1})r_{i+1}^2 = V^2(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})(t_i - t_{i-1})\cos^2 \varepsilon_0 \quad (7)$$

将式(6)代入式(7), 得到位置的关系方程, 考虑到在  $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$  时刻目标的关系方程, 组成矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{(n-1)1} & S_{(n-1)2} & S_{(n-1)3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中:

$$S_{i1} = \frac{\cot^2 \varepsilon_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})} + \frac{\cot^2 \varepsilon_i}{(t_i - t_{i+1})(t_i - t_{i-1})} + \frac{\cot^2 \varepsilon_{i-1}}{(t_{i-1} - t_{i+1})(t_{i-1} - t_i)}$$

$$S_{i2} = \frac{(t_{i+1} - t_0)^2 \cot^2 \varepsilon_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})} + \frac{(t_i - t_0)^2 \cot^2 \varepsilon_i}{(t_i - t_{i+1})(t_i - t_{i-1})} + \frac{(t_{i-1} - t_0)^2 \cot^2 \varepsilon_{i-1}}{(t_{i-1} - t_{i+1})(t_{i-1} - t_i)}$$

$$S_{i3} = \frac{(t_{i+1} - t_0) \cot^2 \varepsilon_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})} + \frac{(t_i - t_0) \cot^2 \varepsilon_i}{(t_i - t_{i+1})(t_i - t_{i-1})} + \frac{(t_{i-1} - t_0) \cot^2 \varepsilon_{i-1}}{(t_{i-1} - t_{i+1})(t_{i-1} - t_i)}$$

$$k_1 = \frac{h_0^2}{V^2 \cos^2 \varepsilon_0}, k_2 = \tan^2 \varepsilon_0, k_3 = \frac{2h_0 \sin \varepsilon_0}{V \cos^2 \varepsilon_0}, i = 2, 3, \dots, (n-1)$$

因此, 目标仰角航迹参数为  $k_1, k_2, k_3$  或为  $h_0/V, \varepsilon_0$ 。为了降低实际测量中噪声的影响, 本文采用总体最小二乘法(total least square algorithm, TLS)来

进行求解,具体求解步骤如下<sup>[8]</sup>:

式(8)可改写为:

$$(\mathbf{S} + \mathbf{E})\mathbf{k} = \mathbf{b} + \mathbf{e} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{k} = [k_1, k_2, k_3]^T$ ,  $\mathbf{b} = [1, 1, \dots, 1]^T$ ,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{e}$  分别为  $\mathbf{S}$  和  $\mathbf{b}$  的扰动误差矩阵。

由于矩阵  $\mathbf{S}$  的扰动误差不为零,其最小二乘解一般是有偏的。因此,应用 TLS 方法来考虑方程式(9)的求解,式(9)可以变换为:

$$(\mathbf{B} + \mathbf{D})\mathbf{z} = 0 \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{B} = [-\mathbf{b}:\mathbf{S}]$ ,  $\mathbf{D} = [-\mathbf{e}:\mathbf{E}]$ ,  $\mathbf{z} = [1, k_1, k_2, k_3]^T$ 。式(10)的 TLS 解可以简单表示为一个解向量  $\mathbf{Z}$ ,使得  $\|\mathbf{D}\|_2 = \min(\mathbf{b} + \mathbf{e}) \in \text{range}(\mathbf{S} + \mathbf{E})$ 。因此,利用奇异值分解(SVD)给出式(10)的 TLS 解。

令  $\mathbf{B} = \mathbf{US}_1\mathbf{V}^*$ ,其中  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$  为酉矩阵,  $\mathbf{S}_1$  为对角阵。则在  $\mathbf{S}_1(3,3)$  明显比  $\mathbf{S}_1(4,4)$  大的情况下,式(10)存在唯一解:

$$\mathbf{k}_{\text{TLS}} = \frac{1}{\nu(1,4)} \begin{bmatrix} \nu(2,4) \\ \dots \\ \nu(4,4) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,  $\nu(i,4)$  是右奇异阵  $\mathbf{V}$  的第 4 列向量中的第  $i$  个元素。

在解算出  $\mathbf{k}_{\text{TLS}}$  后,就可以在已知目标航迹参数及两个时刻的仰角的情况下,外推下一时刻的目标仰角。经整理可得:

$$\frac{h_{i+1}^2 \cot^2 \varepsilon_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})} + \frac{h_i^2 \cot^2 \varepsilon_i}{(t_i - t_{i+1})(t_i - t_{i-1})} + \frac{h_{i-1}^2 \cot^2 \varepsilon_{i-1}}{(t_{i-1} - t_{i+1})(t_{i-1} - t_i)} = V^2 \cos^2 \varepsilon_0 \quad (12)$$

当目标等高飞行时,其结果与式(2)相同。结合式(6)和式(7),可以推导出任意三个时刻的约束关系,由前两个时刻的仰角值及解出目标仰角航迹参数  $k_1, k_2, k_3$ ,估计某时刻的仰角值:

$$K_m \cot^2 \varepsilon_m = 1 - K_l \cot^2 \varepsilon_l - K_n \cot^2 \varepsilon_n \quad (13)$$

其中,  $K_m \triangleq \frac{k_1 + (t_m - t_0)^2 k_2 + (t_m - t_0) k_3}{(t_m - t_l)(t_m - t_n)}$ ,  $K_l, K_n$  依此类推。考虑到等时间间隔观测目标的仰角序列,上面的处理将得到较好的化简。

另外,还可估计目标航迹过地平的时刻和第  $i$  时刻的目标高度:

$$t_z = t_0 - \frac{h_0}{V \sin \varepsilon_0} = t_0 - \frac{k_3}{2k_2} \quad (14)$$

$$h_i = V(t_i - t_z) \sin \varepsilon_0, i = 0, 1, \dots, n$$

然后,利用航迹垂直点和  $t_0$  及任意时刻  $t_m$  目标空间位置与观测站形成的两直角三角形的勾股弦关系相减,可化简得:

$$t_{\perp} = \frac{t_m + t_0}{2} - \frac{\cos^2 \varepsilon_0}{2(t_m - t_0)} \cdot \left[ \frac{k_1 + (t_m - t_0)^2 k_2 + (t_m - t_0) k_3}{\sin^2 \varepsilon_i} - \frac{k_1}{\sin^2 \varepsilon_{t_0}} \right] \quad (15)$$

设  $t'_{\perp}$  为目标过航线到水平面投影航线与观测站的垂直点(上方航线点)的时刻,因而依据几何关系可解出:

$$t'_{\perp} = t_{\perp} + \frac{h_{\perp} \sin \varepsilon_0}{V \cos^2 \varepsilon_0}$$

$$= t_{\perp} + \frac{[h_0 + V(t_{\perp} - t_0) \sin \varepsilon_0] \sin \varepsilon_0}{V \cos^2 \varepsilon_0}$$

$$= t_{\perp} (1 + \tan^2 \varepsilon_0) - t_0 \tan^2 \varepsilon_0 + k_1^{\frac{1}{2}} \tan \varepsilon_0 \quad (16)$$

### 3.2 空间目标匀加速直线飞行模型

设目标在空间沿直线以匀加速  $a$  直线航迹(俯仰角为  $\varepsilon_0$ )飞行,目标从  $t_0$  时刻的开始加速,目标高度为  $h_0$ ,  $t_i$  时刻目标在水平面上的高度为  $h_i$ ,其投影点与观测站的距离为  $r_i$ ,则有:

$$r_i = h_i \cot \varepsilon_i = [h_0 + V(t_i - t_0) \sin \varepsilon_0 + \frac{a}{2}(t_i - t_0)^2 \sin \varepsilon_0] \cot \varepsilon_i, i = 0, 1, \dots, n \quad (17)$$

设相邻时刻分别为:  $t_{i-1}, t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, \dots$ ,其对应目标在水平面上的投影点之间的距离为  $l_{i-1}, l_i, l_{i+1}, \dots$ ,各投影点与观测站的距离分别为:  $r_{i-1}, r_i, r_{i+1}, \dots$ ,前后满足 D. Stewart 定理的方程相减,并整理:

$$r_{i+3}^2 - 4r_{i+2}^2 + 6r_{i+1}^2 - 4r_i^2 + r_{i-1}^2 = 6\Delta^2 \quad (18)$$

将式(17)代入式(18),得到位置的关系方程,组成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{(n-3)1} & S_{(n-3)2} & S_{(n-3)3} & S_{(n-3)4} & S_{(n-3)5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中:

$$S_{im} = (t_{i+3} - t_0)^{m-1} \cot^2 \varepsilon_{i+3} - 4(t_{i+2} - t_0)^{m-1} \cdot \cot^2 \varepsilon_{i+2} + 10(t_{i+1} - t_0)^{m-1} \cot^2 \varepsilon_{i+1} - 4(t_i - t_0)^{m-1} \cdot \cot^2 \varepsilon_i + (t_{i-1} - t_0)^{m-1} \cot^2 \varepsilon_{i-1}$$

$$(m = 1, 2, \dots, 5; i = 1, 2, \dots, n)$$

$$k_1 = \frac{h_0^2}{6a^2 T^4 \cos^2 \varepsilon_0}, k_2 = \frac{h_0^2 V \sin \varepsilon_0}{3a^2 T^4 \cos^2 \varepsilon_0},$$

$$k_3 = \frac{(V^2 \sin \varepsilon_0 + h_0 a) \sin \varepsilon_0}{6a^2 T^4 \cos^2 \varepsilon_0}, k_4 = \frac{V \sin^2 \varepsilon_0}{6a^2 T^4 \cos^2 \varepsilon_0},$$

$$k_5 = \frac{\tan^2 \varepsilon_0}{24T^4}$$

为了降低实际情况中噪声的影响,这里采用类似上述的总体最小二乘法,可解出式(19)计算航迹参数。得到结果后,其约束条件可实现前项预测:

$$K_{(i+3)m} \cot^2 \varepsilon_{i+3} - 4K_{(i+2)m} \cot^2 \varepsilon_{i+2} + 6K_{(i+1)m} \cot^2 \varepsilon_{i+1} - 4K_{im} \cot^2 \varepsilon_i + K_{(i-1)m} \cot^2 \varepsilon_{i-1} = 1 \quad (20)$$

通过分析匀速直线和匀加速直线的情况可知,目标航迹的航向仰角只与目标的仰角序列有关,与其他无关。

#### 4 仿真实验

由于等高飞行是斜直线飞行的一种特殊情况,因此本文主要对斜直线飞行目标的匀速和匀加速模型进行仿真。

##### 4.1 目标匀速直线运动模型

假设传感器位置(0,0,0)(单位:m),目标以速度值为200(单位:m/s),方向矢量(3/4, -1/2, sqrt(3)/4)进行匀速飞行,初始点为(300,500,800)(单位:m),观测周期  $T=0.05$  s,对目标进行连续测量40 s。

由于传感器只能获取目标的仰角信息,假设仰角测量过程中噪声的标准差  $\sigma_n = 0.003$  rad,所以在估计初始俯仰角  $\varepsilon_0$  时,分别采用窗宽为10和20的两种情形进行解算,分别进行100次 Monte-Carlo 实验,其估计结果如图3所示,解算的均方根误差(RMSE)如图4所示。

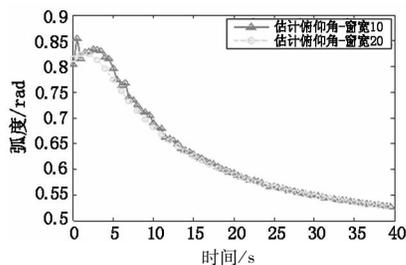


图3 初始俯仰角解算结果

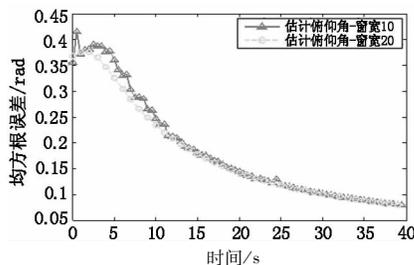


图4 解算结果的均方根误差

本文采用窗宽为20的估计结果来估计目标仰角,其中具体的连续跟踪方法为:首先利用第  $i$  和  $(i+1)$  时刻的测量值  $\varepsilon_i$  和  $\varepsilon_{i+1}$  来计算下一时刻仰角估计值  $\varepsilon'_{i+2}$ ,再利用第  $(i+2)$  时刻的测量值  $\varepsilon_{i+2}$  对  $\varepsilon'_{i+2}$  进行修正,得到第  $(i+2)$  时刻的估计值  $\varepsilon''_{i+2}$ ,然后采用此方法对仰角进行连续跟踪。最后,

对估计结果进行5阶平均值滤波,得到的结果如图5、图6所示。

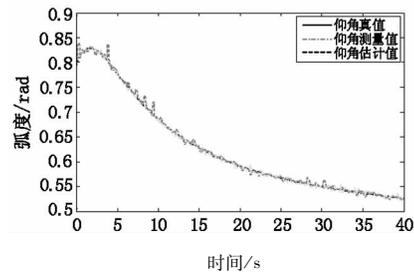


图5 仰角的真实值、估计值和测量值比较

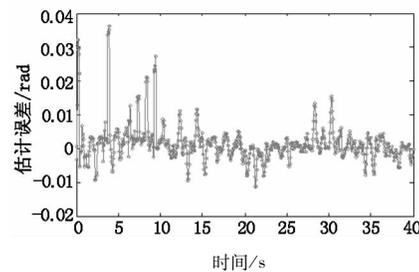


图6 目标仰角的估计误差

从图5、图6的仿真结果可以得出,本文利用解算参数航迹的方法,可以较精确地估计出目标的仰角,估计误差较小。其中由于数据截断效应,使得图6的仿真结果在数据处理的初期时估计误差较大,但是随着跟踪时间的延长,估计误差逐渐降低直至稳定。因此,利用纯仰角参数航迹模型对匀速直线目标进行仰角跟踪,估计的仰角值能较好地趋近于真实仰角,从而证实本文算法的有效性。

##### 4.2 目标匀加速直线运动模型

假设传感器位置(0,0,0)(单位:m),目标以初速度值为150(单位:m/s),加速度为3(单位:m/s<sup>2</sup>),方向矢量(3/4, -1/2, sqrt(3)/4)进行匀速飞行,初始点为(300,500,800)(单位:m),观测周期  $T=0.05$  s,对目标进行连续测量40 s。

假设仰角测量过程中噪声的标准差  $\sigma_n = 0.003$  rad。在估计初始俯仰角  $\varepsilon_0$  时,分别采用窗宽为10和20的两种情形进行解算,分别进行100次 Monte-Carlo 实验,其解算结果如图7所示,解算的均方根误差(RMSE)如图8所示。

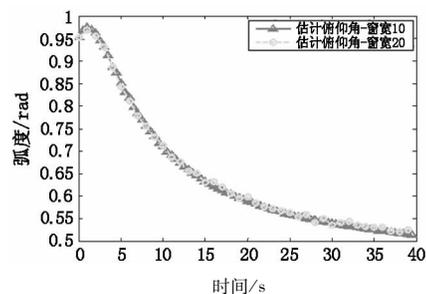


图7 初始俯仰角解算结果

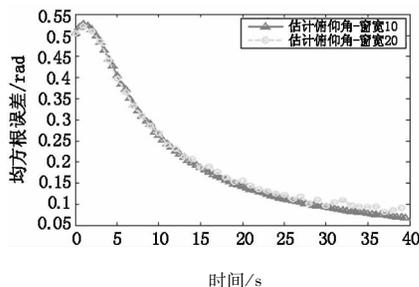


图8 滤波结果的均方根误差仿真结果

本文采用窗宽为10的估计结果来解算目标仰角,同样采用仿真(1)的仰角连续跟踪的方法,最后对估计结果进行5阶平均值滤波,仿真结果如图9和图10所示。

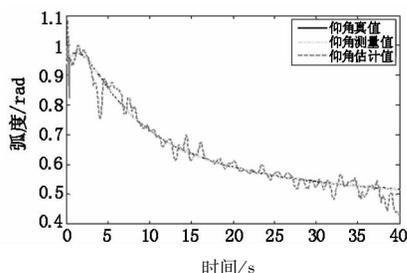


图9 仰角的真实值、估计值和测量值比较

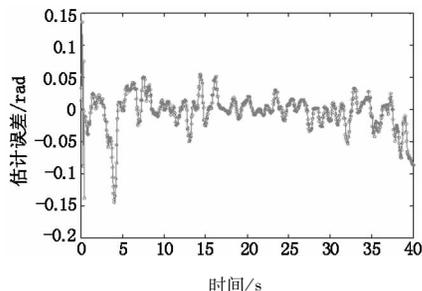


图10 目标仰角的估计误差

从图9、图10的仿真结果可以得出,当目标处于匀加速状态时,本文方法可以较好地估计出目标的仰角值。而由于数据截断效应,使得仰角的估计结果在数据处理初期和末期的估计误差较大。从整体上观察可得,由于噪声以及非线性因素的影响,使得对匀加速直线运动目标进行仰角跟踪时,估计的仰角值出现了一定波动,估计性能比匀速状态时有所降低。因此,可以通过采用其他滤波方法来进一步提高仰角的估计精度。

## 5 结论

本文依据斯图瓦尔特定理的距离关系,提出了一种新的纯仰角的目标参量滤波平滑原理,该算法依据空间目标的几何与代数关系,直接利用传感器测量到的目标俯仰角信息,对目标航迹的仰角值进行估计,对匀速、匀加速直线运动的目标均有较好的跟踪效果。仿真结果表明了该方法有效性。

本文方法是建立在分布式信息融合系统基础上,采用并行处理方式分别对匀速模型和匀加速模型条件下的纯仰角信息进行滤波估计,通过比较估计误差来确定具体选用的模型方式。由于在解参数过程中的矩阵元素包括非线性函数,其解对噪声较为敏感,因此如何加强滤波和对多目标航迹参数进行有效融合,是下一步的工作。

## 参考文献:

- [1] Liu Jinmang, Ji Hongbing. A new parameterized track filtering method for single-station based bearing-only infrared target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9): 2253 - 2257. (in Chinese)  
刘进忙, 姬红兵. 一种新的单站红外目标纯方位参数航迹滤波方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2253 - 2257.
- [2] Liu Jinmang, Wu Zhonglin. Method to estimate the trajectory of space target with infrared mono-station[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(10): 1167 - 1171. (in Chinese)  
刘进忙, 吴中林. 运动红外单站跟踪空中目标的方向估计方法[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1167 - 1171.
- [3] Zhang Tao, Wei Xianzhi. Bearings-only tracking based on double wave band information fusion[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(4): 454 - 458. (in Chinese)  
张涛, 魏贤智. 基于双波段方位信息融合的单站纯方位跟踪[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 454 - 458.
- [4] K Dogancay, G Ibal. Instrumental variable estimator for 3D bearing-only emitter localization [C]. ISSNIP, Melbourne, Australia, 2005: 63 - 68.
- [5] A N Bishop, P N Pathirana. Localization of emitters via the intersection of bearing lines: A ghost elimination approach[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2007.
- [6] Kutluyl Dogan ay. Bias compensation for the bearings-only pseudo linear target track estimator[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(1): 59 - 67.
- [7] Adrian N Bishop, Brian D O Anderson, Baris Fidan, et al. Bearing-only localization using geometrically constrained optimization[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2009, 45(1): 308 - 320.
- [8] Sun Jinwei, Liu Xin. TLS algorithm-based study on multi-function sensor data reconstruction [J]. Acta Electronic Sinica, 2004, 32(3): 391 - 394. (in Chinese)  
孙金玮, 刘昕. 基于总体最小二乘的多功能传感器信号重构方法研究[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 391 - 394.