

文章编号 1004-924X(2004)02-0169-05

# 组合 Kalman 隔点预测法用于跟踪 机动目标的仿真研究

袁洪印<sup>1</sup>, 郭立红<sup>1</sup>, 谭振江<sup>2</sup>, 柳玉晗<sup>1</sup>, 邢忠宝<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 吉林师范大学, 吉林 四平 136000)

**摘要:** 将 Kalman 预测法用于经纬仪跟踪机动目标, 对不同靶标旋转速度下的机动目标跟踪进行了仿真研究。提出了状态方程输入矩阵  $G(k)$ , 用以弥补等角速度方程的加速度项。根据 Kalman 预测曲线与实测曲线误差的标准方差最小原则, 确定了状态噪声与测试噪声的方差比值  $Q/R$ , 并优化了适合经纬仪的比值  $Q/R$ 。提出了组合 Kalman 隔点预测法, 进行了 1, 2, 3 个隔点的仿真预测研究。仿真结果表明, 组合 Kalman 隔点预测法可以实现经纬仪隔点跟踪目标。

**关键词:** 目标跟踪; Kalman 预测; 跟踪; 机动目标; 仿真

中图分类号: V556.5 文献标识码: A

## Tracking mobile target by composed Kalman leap prediction method

YUAN Hong yin<sup>1</sup>, GUO Li hong<sup>1</sup>, TAN Zherr jiang<sup>2</sup>, LIU Yur han<sup>1</sup>, XING Zhong bao<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*2. Jilin Normal University, Siping 136000, China)*

**Abstract:** By using the input matrix of state equation  $G(k)$  to make up the acceleration term of the constant angular velocity model, establishing the deviation ratio of state noise and test noise  $Q/R$  and optimizing the ratio  $Q/R$  for theodolite following the principle of least standard deviation of Kalman prediction curve from practical curve, composed Kalman leap prediction method is proposed for application to a theodolite for tracking mobile targets. Simulation research was conducted for tracking mobile targets at different target beacon velocities with predictions of 1, 2 and 3 leaps made. Simulation results showed that composed Kalman leap prediction method can be applied to a theodolite for tracking mobile targets.

**Key words:** target tracking; Kalman prediction; tracking; mobile target; simulation

## 1 引言

目前, 经纬仪对机动目标的跟踪主要靠伺服控制系统来实现。数字化伺服系统提高了经纬仪

的跟踪精度<sup>[1,2]</sup>。利用一种预测方法, 预见性地给出机动目标未来达到的位置, 再将此信息交给伺服系统处理, 将提高经纬仪的跟踪精度, 这实际上也是数据融合研究的部分内容。Kalman 预测法是一个对机动目标跟踪的预测算法<sup>[3,4]</sup>。根据机

动目标的运动特点, 选用适当的设备控制方程(模型), 合理计算设备噪声误差, 可以实现对经纬仪经纬仪跟踪机动目标时, 测量电视(或红外电视)的脱靶量与编码器位置等数据采集信号传输到主控机上都有一定的时间延迟。为了弥补这些数据采集信号的时间延迟, 需要将原来的应用当前点数据预测下一点的 Kalman 预测法改进为能够预测第 2 点、第 3 点甚至更多点的方法, 即所谓的 Kalman 隔点预测法。根据隔点数将此法组合起来, 即组合 Kalman 隔点预测法, 就可完成对经纬仪跟踪机动目标的预测仿真。

本文就组合 Kalman 隔点预测法、最小误差下的噪声选择以及组合 Kalman 隔点预测法的适用性进行了深入的探讨。

## 2 Kalman 预测法

设跟踪目标状态方程和量测方程为如下形式<sup>[3-5]</sup>:

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + G(k)W(k), \quad (1)$$

$$Y(k) = H(k)X(k) + V(k), \quad (2)$$

式中  $X(k) \in R^n$  为  $n$  维目标状态向量,  $Y(k) \in R^m$  为  $m$  维量测向量,  $W(k) \in R^p$  和  $V(k) \in R^m$  分别为状态噪声和量测噪声, 且为互不相关的高斯白噪声向量序列, 其协方差矩阵分别为  $Q(k)$  和  $R(k)$ 。  $\Phi(k+1, k) \in R^{n \times n}$ ,  $G(k) \in R^{n \times p}$  和  $H(k) \in R^{m \times n}$  分别为状态转移矩阵、输入矩阵和观测矩阵。  $W(k)$  和  $V(k)$  的统计特性为:

$$E[W(k)] = 0, E[W(k)W^T(j)] = Q(k)\delta_{kj}$$

$$E[V(k)] = 0, E[V(k)V^T(j)] = R(k)\delta_{kj}$$

并且初始状态  $X_0$  与  $W(k)$ ,  $V(k)$  独立, 即:

$$E[X_0W^T(k)] = 0, E[X_0V^T(k)] = 0$$

卡尔曼预测基本公式如下: 增益公式

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)$$

$$[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1}, \quad (3)$$

方差预测公式

$$P(k+1|k) = \Phi(k+1, k)[I - K(k)H(k)]P(k|k-1)\Phi^T(k+1, k) + G(k)Q(k)G^T(k), \quad (4)$$

的跟踪仿真, 进而在经纬仪上用 Kalman 预测法实现数字引导跟踪机动目标的设想。

状态预测公式

$$X(k+1|k) = \Phi(k+1, k)X(k|k-1) + \Phi(k+1, k)K(k)[Y(k) - H(k)X(k|k-1)], \quad (5)$$

根据上述公式, 只要已知初始点的位置和预测方差, 就可预测下一点的位置和方差, 从而实现逐点预测。

## 3 组合 Kalman 隔点预测算法的实现

### 3.1 等角速度模型

经纬仪跟踪目标的状态变量(俯仰角或方位角)用  $x(t)$  代表, 其角速度  $\dot{x}_2(t) = \dot{x}_1(t)$ , 则有等角速度的控制方程<sup>[3]</sup>

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t), \quad (6)$$

设采样间隔  $T_k = t_{k+1} - t_k$ , 则有跟踪目标的离散时间状态方程和测量方程

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} T_k^2/2 \\ T_k \end{bmatrix} w(k), \quad (7)$$

$$y(k) = (1 \ 0)x(k) + v(k), \quad (8)$$

式(1)和式(2)对比, 有  $\Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $H(k) = (1 \ 0)$ ,  $G(k) = \begin{bmatrix} T_k^2/2 \\ T_k \end{bmatrix}$ 。

$Q(k)$  和  $R(k)$  的取值通过仿真结果分析计算确定。  $G(k)$  值是作者为弥补等角速度控制方程的加速度而提出的。为保证初始点估计无偏, 取第 2 点作为预测初始点。

### 3.2 组合 Kalman 隔点预测法

隔点预测就是加大预测步长,  $T_k$  为采样间隔  $\Delta t$  的整数倍, 漏掉预测步长的内点进行预测。如隔一点预测, 即漏掉  $t_{k+1}$  点, 步长  $T_k = 2(t_{k+1} - t_k) = 2\Delta t = t_{k+2} - t_k$ ; 隔二点预测, 即漏掉  $t_{k+1}$  和  $t_{k+2}$  点, 步长  $T_k = 3(t_{k+1} - t_k) = 3\Delta t = t_{k+3} - t_k$ 。以上采样间隔  $\Delta t$  不变。

为了弥补隔点预测漏掉的点的预测值, 按图

1 的方式将隔点预测组合起来, 便形成了组合隔点预测。这样, 既保证了采样间隔点上都有预测值, 也保证了数据采集信号时间延迟的弥补。从图中看出: 2 个隔 1 点预测组合完成预测第 2 点, 3 个隔 2 点预测组合完成预测第 3 点, 4 个隔 3 点预测组合完成预测第 4 点。

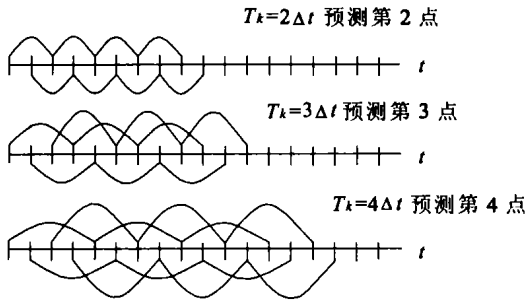


图 1 组合 Kalman 隔点预测示意图

Fig. 1 Sketch of composed Kalman leap prediction

### 4 仿真结果与分析

根据上述公式及初始点的确定, 应用 Matlab 编写程序, 计算实测与预测的位置曲线差值的标准方差  $Dee$  (包括最大值  $Dmax$  和最小值  $Dmin$ )、显示实测与预测的位置与速度曲线。对靶标不同旋转速度下, 靶标旋转一周的位置与速度的实测和预测值进行对比。以实测与预测的位置曲线的标准方差最小为原则, 选择靶标不同旋转速度下合适的  $Q(k)$  和  $R(k)$  值。选择了靶标 6 000 点/周、960 点/周、580 点/周和 460 点/周 4 个旋转速度进行测试<sup>[4]</sup>与仿真。首先, 根据 4 个速度的测试位置值, 用 Kalman 预测法计算出各速度的最小误差条件下的噪声比值  $Q/R$ 。计算时发现,  $Q(k)/RR(k)$  的比值  $Q/R$  直接影响  $Dee$  值, 因此不用单独确定  $Q(k)$  或  $RR(k)$  的具体值。然后优选出适合靶标 4 个旋转速度的噪声比值  $Q/R$ 。Kalman 预测与优化结果如表 1 所示。

表 1 Kalman 预测结果与优化结果

Tab. 1 Kalman prediction results and optimization results

$Dee(^{\circ})$	$Dmax(^{\circ})$	$Dmin(^{\circ})$	$Q/R$	$Dee(^{\circ})$	$Dmax(^{\circ})$	$Dmin(^{\circ})$	$Q/R$	Velocity (points/circle)
2.131	8.287	-16.400	10 000/0.002	4.160	26.880	-16.400	10 000/0.000 014	6 000
2.089	6.468	-5.319		4.836	11.095	-11.513		
8.266	26.401	-28.669	10 000/0.0003	10.015	30.289	-35.883	10 000/0.000 014	960
8.877	34.727	-26.134		14.971	48.174	-46.216		
9.379	26.605	-28.649	10 000/0.000 004	9.884	27.884	-28.493	10 000/0.000 014	580
7.270	22.607	-17.837		6.326	19.994	-14.370		
13.288	37.053	-31.672	10 000/0.0000015	14.826	36.520	-37.161	10 000/0.000 014	460
10.063	31.621	-27.523		8.436	25.728	-19.004		

表中对靶标每个旋转速度分方位角(上一行)和俯仰角(下一行)两行数据。优选后, 适合靶标 4 个速度的噪声比值  $Q/R = 10\ 000/0.000\ 014$ , 此时  $Dee \leq 14.971^{\circ}$ , 极大值发生在靶标速度 960 点/周。

根据优选的噪声比, 对上述靶标 4 个旋转速度, 应用隔点预测和组合隔点预测, 在靶标旋转一周的数据范围内进行仿真计算。Kalman 隔点预

测与组合 Kalman 隔点预测仿真结果分别列在表 2 和表 3 中。

从表 2 和表 3 中看出:

(1) 在隔点预测与组合隔点预测时, 间隔的点越多, 预测结果的位置与测试位置误差的标准差越大, 这是一般预测方法的共性问题。

(2) 同样条件下, 组合隔点预测比隔点预测的误差要大。这是因为组合隔点预测都是由几个隔

点预测组合而成的, 组合的结果造成了误差的积累。

(3) 在隔点预测与组合隔点预测时, 总的趋势

是靶标旋转速度越大, 预测误差越大。这说明等角速度模型对于低速机动目标的跟踪精度要高于高速机动目标的跟踪精度。

表 2 Kalman 隔点预测结果

Tab. 2 Kalman leap prediction results

One leap prediction			Two leaps prediction			Three leaps prediction			Velocity (points/circle)
Dee(")	Dmax(")	Dmin(")	Dee(")	Dmax(")	Dmin(")	Dee(")	Dmax(")	Dmin(")	
5.355	32.641	-31.045	6.702	33.454	-33.485	8.416	43.424	-40.624	6000
4.095	16.247	-17.622	19.432	73.707	-75.593	12.187	67.604	-66.481	
11.682	46.877	-52.919	21.132	87.932	-119.409	31.462	160.226	-164.011	960
13.064	53.637	-55.157	24.687	124.449	-136.264	36.840	264.799	-205.597	
21.713	69.793	-82.709	40.117	150.102	-183.646	57.747	254.038	-311.622	580
12.801	52.410	-36.191	28.027	102.754	-98.204	34.146	205.393	-127.589	
33.432	102.643	-110.315	59.009	226.957	-211.434	89.504	390.327	-382.021	460
18.413	79.758	-40.778	37.703	189.836	-107.963	47.881	279.713	-151.535	

表 3 组合 Kalman 隔点预测结果

Tab. 3 Composed Kalman leap prediction results

Predicting 2nd point			Predicting 3rd point			Predicting 4 <sup>th</sup> point			Velocity (points/circle)
Dee(")	Dmax(")	Dmin(")	Dee(")	Dmax(")	Dmin(")	Dee(")	Dmax(")	Dmin(")	
7.230	32.641	-31.045	11.262	33.454	-33.485	19.175	67.626	-66.836	6000
5.784	16.247	-17.622	32.372	73.707	-75.593	26.420	72.738	-71.380	
16.304	48.288	-52.919	38.246	127.646	-119.409	68.037	201.261	-218.645	960
18.891	57.874	-55.157	43.146	152.990	-136.264	79.699	264.799	-220.6547	
30.777	69.793	-82.709	69.086	153.742	-183.705	117.085	279.848	-311.622	580
17.883	52.721	-36.191	50.442	126.999	-126.580	67.599	244.129	-127.762	
47.236	102.643	-121.126	102.380	242.593	-262.301	177.919	390.327	-393.627	460
25.951	79.758	-41.728	60.122	189.836	-127.787	101.581	336.243	-178.988	

(4) 组合隔点预测第 2 点  $Dee \leq 47.236''$ ; 组合隔点预测第 3 点  $Dee \leq 102.380''$ ; 组合隔点预测第 4 点  $Dee \leq 177.919''$ 。分别是直接 Kalman 预测 Dee 的 3~11 倍。从经纬仪跟踪精度要求来看, 组合隔点预测第 2 点和第 3 点的精度能够满足要求。

## 5 结 论

等角速度模型的状态方程输入矩阵  $G(k)$  的选择, 使机动目标运动的加速度项得到了描述。

仿真预测结果说明了此选择的正确性。

等角速度模型噪声比  $Q/R$  的选取, 解决了以最小预测误差 Dee 原则经纬仪跟踪机动目标的仿真问题。

提出了组合 Kalman 隔点预测法, 在数据融合方面解决了脱靶量与编码器数据采集信号传输到主控机上的时间延迟情况下实现对经纬仪跟踪机动目标的仿真问题。为下一步组合隔点 Kalman 预测法在经纬仪数字引导跟踪机动目标得到实际应用奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 黄永梅, 马佳光, 傅承毓. 预测滤波技术在光电经纬仪中的应用仿真[J]. 光电工程, 2002, 29(4): 5-9.  
HUANG Y M, MA J G, FU CH Y. Simulation for the application of prediction filtering technique in photoelectric theodolite[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2002, 29(4): 5-9.
- [2] 王连明, 葛文奇, 李杰. 跟踪系统中跟踪器延迟的自适应预测补偿方法[J]. 光电工程, 2002, 29(4): 13-16.  
WANG L M, GE W Q, LI J. Adaptive prediction and compensation method for delay of tracker in tracking system [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2002, 29(4): 13-16.
- [3] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.  
ZHOU H R, JING ZH L, WANG P D. *Mobile target tracking* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.
- [4] 何友, 王国宏. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.  
HE Y, WANG G H. *Multisensor information fusion with applications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.
- [5] 冯纘刚, 郭治. 随机控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.  
FENG Z G, GUO ZH. *Random control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.

作者简介: 袁洪印(1963-), 男, 吉林松原人, 教授, 工学博士, 吉林农业大学工程技术学院副院长, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所站博士后, 主要研究方向为计算机应用与数据融合。E-mail: yuanhongyin@sina.com

## 欢迎订阅《中国光学与应用光学文摘》

《中国光学与应用光学文摘》是经国家科委批准, 由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办的国家级检索刊物, 该刊主要收录我国科研人员在国内期刊和有关会议上发表的科技论文和会议论文, 年收录量 5 000 篇左右。《中国光学与应用光学文摘》以文摘形式报道国内光学、光电子学领域的理论研究动态、最新科研成果和相关创新技术, 是国内该领域唯一的检索刊物, 是了解光电子行业相关科技信息的最新窗口, 以报道时差短、检索途径多、信息量充实为特色。

《中国光学与应用光学文摘》为双月刊, A4 开本, 110 页。国内邮发代号: 12-140, 国外发行代号: BM6782, 定价: 15 元/期, 全年 90.00 元。为满足不同订户的要求, 编辑部亦随时办理破年、破季订阅。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

联系人: 杨妹清

地 址: 长春市东南湖大路 16 号

邮 编: 130033

电 话: (0431) 6176853

账 户: 中科院长春光学精密机械与物理研究所

http: //www. ciom. ac. cn

账 号: 01471908091001

E-mail: yanh@ciomp.ac.cn

银 行: 中行吉林省分行营业部