

交互式多模型算法在光电跟踪控制系统中应用的仿真

刘小强,任高辉,邢军智,寿少峻,张惠菁

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘要: 分析目标运动参数滤波算法在光电跟踪控制系统中的作用,在交互式多模型算法的基础上,提出了该算法在光电跟踪控制系统中的应用问题,并建立了在光电跟踪控制系统中使用的仿真模型,通过仿真环境下光电跟踪控制系统对不同目标跟踪的数据分析可知,该算法可作为光电跟踪控制系统中复合控制前馈数据的获取算法使用,光电跟踪控制系统采用交互式多模型算法比采用 α - β - γ 滤波算法更适合对机动目标的跟踪。

关键词: 控制系统; 交互式多模型算法; 光电跟踪; 复合控制

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0917003

Simulation of application of IMM in photoelectric tracking control system

Liu Xiaoqiang, Ren Gaohui, Xing Junzhi, Shou Shaojun, Zhang Huijing

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: By analyzing the roles of target motion parameter filter used in photoelectric tracking control system and the principle of IMM (Interacting Multiple Model), application of IMM filter used in photoelectric tracking control system was proposed. Simulator model of Application of IMM used in photoelectric tracking control system was established. By analyzing different target tracking data in simulation environment, the interactive multiple model algorithm could be used as a feedforward control data acquisition algorithm of combinational control technology in photoelectric tracking control system, photoelectric tracking control system uses interactive multiple model algorithm was more suitable than using α - β - γ filter for tracking of maneuvering targets.

Key words: control system; IMM; photoelectric tracking; combinational control

收稿日期:2016-01-05; 修订日期:2016-02-03

作者简介:刘小强(1979-),男,高级工程师,主要从事光电设备跟踪、稳定控制相关算法方面的研究。Email:21877756@qq.com

0 引言

随着光电技术的发展,光电跟踪设备作为传统目标探测、跟踪手段的有效补充,越来越多地应用到武器装备中。跟踪控制系统作为光电跟踪设备的重要组成部分,控制着光学探测单元按要求运动,以实现目标的跟踪定位。

当光电跟踪设备跟踪低速目标时,采用传统“速度”+“位置”闭环反馈控制系统,通常可满足要求,但当目标速度较快,机动性较高时,传统的闭环系统很难使跟踪精度满足要求,为此光电跟踪设备的控制系统会采用复合控制技术^[1]。其中实时目标运动参数的获取是使用复合控制技术的关键环节,通常是通过目标运动轨迹进行滤波来实现,交互式多模型算法是 Blom H.A.P 于 1984 年提出来的是一种适合对机动目标运动轨迹滤波估计的算法,已知的关于交互式多模型算法的文献只涉及滤波算法研究,而算法与控制系统结合使用的研究在公开文献中未见报道。

1 目标运动参数滤波算法在光电跟踪控制系统中的作用

在光电跟踪控制系统中,复合控制技术是减小机动目标跟踪滞后误差的有效手段,该项技术是一种前馈与反馈相结合的控制技术,其技术的原理图见图 1。

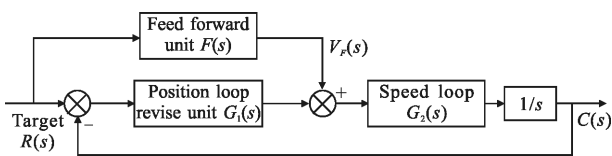


图 1 光电跟踪控制系统复合控制技术原理图

Fig.1 Principle block diagram of combinational control of photoelectric tracking system

图 1 中 s 为拉普拉斯算子, $R(s)$ 为目标在光电测量坐标系^[2]下的位置,如果在目标跟踪过程中,目标运动的速度 $sR(s)$ 和加速度 $s^2R(s)$ 可知,则:

$$V_F(s) = F(s)R(s) = f_1 sR(s) + f_2 s^2R(s) \quad (1)$$

可实现,其中 f_1, f_2 是速度前馈系数和加速度前馈系数。速度环路传递函数:

$$G_2(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} \quad n > m \quad (2)$$

便于分析, $G_1(s)$ 取比例校正 k_1 , 则误差传递函数如公式(3)所示:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s - F(s)G_2(s)}{s + G_1(s)G_2(s)} = \frac{(a_0 - b_0f_1)s + (a_1 - b_1f_1 - b_0f_2)s^2 + (a_2 - b_2f_1 - b_1f_2)s^3 + \dots + a_ns^{n+1}}{k_1b_0 + (a_0 + k_1b_1)s + (a_1 + k_1b_2)s^2 + \dots + a_ns^n} \quad (3)$$

公式(3)中,当 $f_1 = b_0/a_0, f_2 = \frac{a_0a_1 - b_0b_1}{a_0b_0}$ 时,控制系统

由原来未加 $F(s)$ 的 I 型系统变成 III 型系统。可见复合控制在光电系统跟踪中,起到提高跟踪精度的关键作用,而 $V_F(s)$ 是否可实现是制约复合控制技术使用的关键,其中 f_1 和 f_2 与速度环特性有关,可以通过频率测试或者半实物仿真测试获得,如果能够准确获取目标运动速度 $sR(s)$ 和加速度 $s^2R(s)$, 则 $V_F(s)$ 可实现。但对于光电跟踪系统, $R(s)$ 是时变而不可预知的,目前获取目标运动速度 $sR(s)$ 和加速度 $s^2R(s)$ 的有效手段为在跟踪过程中对目标运动参数进行实时滤波,滤波算法的优劣决定了跟踪系统复合控制技术使用的成败。

2 交互式多模型算法

在目标运动参数滤波算法中目标模型的选择直接关系到滤波性能的好坏,传统滤波算法如 $\alpha - \beta - \gamma$ 滤波器或者 Kalman 滤波器,仅采用单一模型对运动目标进行匹配,存在运动模型的先验知识与目标运动方式不匹配的矛盾。假设有一种滤波器能够采用不同个模型,模型之间可以根据量测数据进行转换,对输出数据根据某种准则进行融合,应该可以极大地降低由于模型不匹配带来的误差,而交互式多模型方法正是这样一种方法。

交互式多模型算法是在广义伪贝叶斯算法的基础上的一种具有马尔科夫切换系数的滤波算法,基本思想^[3-6]在于使用不同的运动模型来匹配目标不同的运动状态,每个模型对应于不同的机动水平,在采用 Kalman 滤波的基础上计算出各模型为正确时的后验概率,通过对各模型正确时的状态估计加权而来给出最终的目标状态估计,加权因子为模型正确的后验概率,其基本原理图如图 2 所示,图中 $M_i(k)$ 为模型集中的第 i 个模型; $X_i(k-1/k-1)$ 为第 i 个模型上一周期的状态估计; $Z(k)$ 为本周期的量测输入; $\Lambda_i(k)$

为观测 $Z(k)$ 的似然函数; $u(k)$ 为模型更新概率; $X_i(k/k)$ 为第 i 个模型本周期的状态估计; $X(k/k)$ 为交互式多模型算法的综合状态输出。算法的具体实现细节可参考文献[4]或者韩崇昭教授的《多源信息融合》。

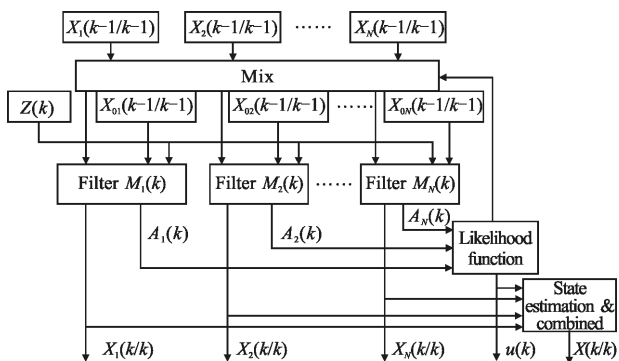


图 2 交互式多模型算法原理图

Fig.2 Principle diagram of IMM filter algorithm

3 交互式多模型算法在光电跟踪控制系统中的使用方法

交互式多模型算法在光电跟踪控制系统中是作为复合控制技术的前馈参数获取算法使用, 其使用效果除了与算法本身的机理、目标模型的选择相关外, 与目标模型的参考坐标系相关性极大, 在光电跟踪控制系统中, 同时采用直角坐标系和光电测量球

坐标系。采用该混合坐标系的好处是直角坐标系的目标运动参数变化率小, 目标状态方程的线性度误差小; 在光电测量球坐标系中, 目标斜距、方位和俯仰等可独立得到。再利用坐标变换, 滤波与预测过程便可在直角坐标系下方便地完成。

直角坐标系 $O-XYZ$ 定义为: O 为原点, 跟踪系统方位轴与俯仰轴的交汇点; Y 轴平行于水平面, OY 指方位系统零位, 前方为正; X 轴平行于水平面, OX 垂直于 OY , 指向右方向为正; Z 轴垂直于 XOY 平面, 向上为正。光电测量球坐标系 $O-R\beta\varepsilon$ 定义: R 为瞄准线方向或目标斜距; β 为方位角, 以 OY 为基准, 顺时针方向为正; ε 为俯仰角, 以 XOY 平面为基准, 向上为正。

由于目标的运动模型是针对直角坐标系建立, 所以交互式多模型算法以直角坐标系为基准进行运算。量测数据在光电测量球坐标系下获得, 经过坐标变换至直角坐标系下作为交互式多模型算法的量测输入, 交互式滤波算法在直角坐标系下的输出经过坐标变换至光电测量球坐标系后经前馈通道加入光电闭环跟踪控制系统, 其相互作用的原理见图 3, 此处所讲的光电闭环跟踪控制系统是指在光电跟踪控制系统中排除前馈通道相关环节后剩下的部分, 即仅依靠目标误差信号进行闭环跟踪的部分。

光电闭环跟踪控制系统选择方位+俯仰两轴系统,

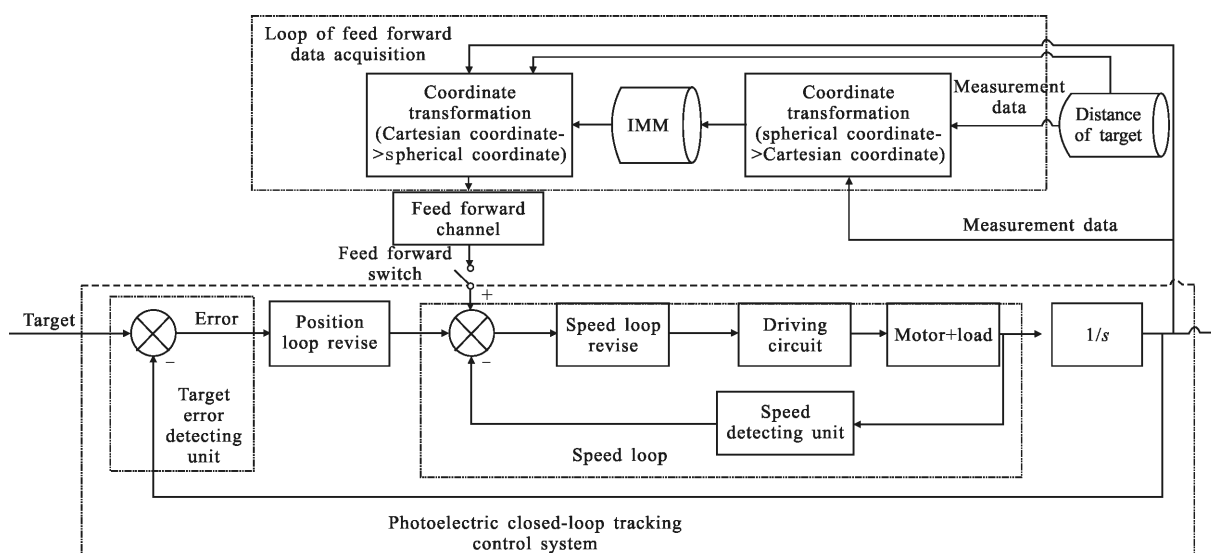


图 3 交互式多模型算法在光电跟踪控制系统中的应用原理图

Fig.3 Principle diagram of application of IMM in photoelectric tracking control system

方位、俯仰两个轴的构成基本相同,图 3 以单轴为例进行说明。对于控制系统,单轴系统是由电机+负载、功率驱动、速率检测、速率环校正、位置环校正、目标误差检测等环节构成,具体内容可参考文献[1-2]和[9]。

对照图 3,当目标误差检测单元发现目标后,首先光电闭环跟踪控制系统依靠检测误差在光电测量球坐标系下跟踪目标,测量数据送入前馈数据获取回路,交互式多模型算法开始运算,此时前馈开关是断开的,即前馈数据在控制系统中不起作用,当交互式多模型算法过渡过程结束,数据输出稳定后,前馈

开关闭合,控制系统由单纯的闭环控制转换为复合控制系统。

4 交互式多模型算法在光电跟踪控制系统中使用的仿真

4.1 仿真模型组成及参数说明

仿真是在 MATLAB 环境下由 Simulink 模型结合 M 文件实现,仿真模型包括 4 个部分(见图 4),由 Simulink 模型构成光电闭环跟踪控制系统、由 s_function^[7]功能实现的目标生成的模块、前馈数据

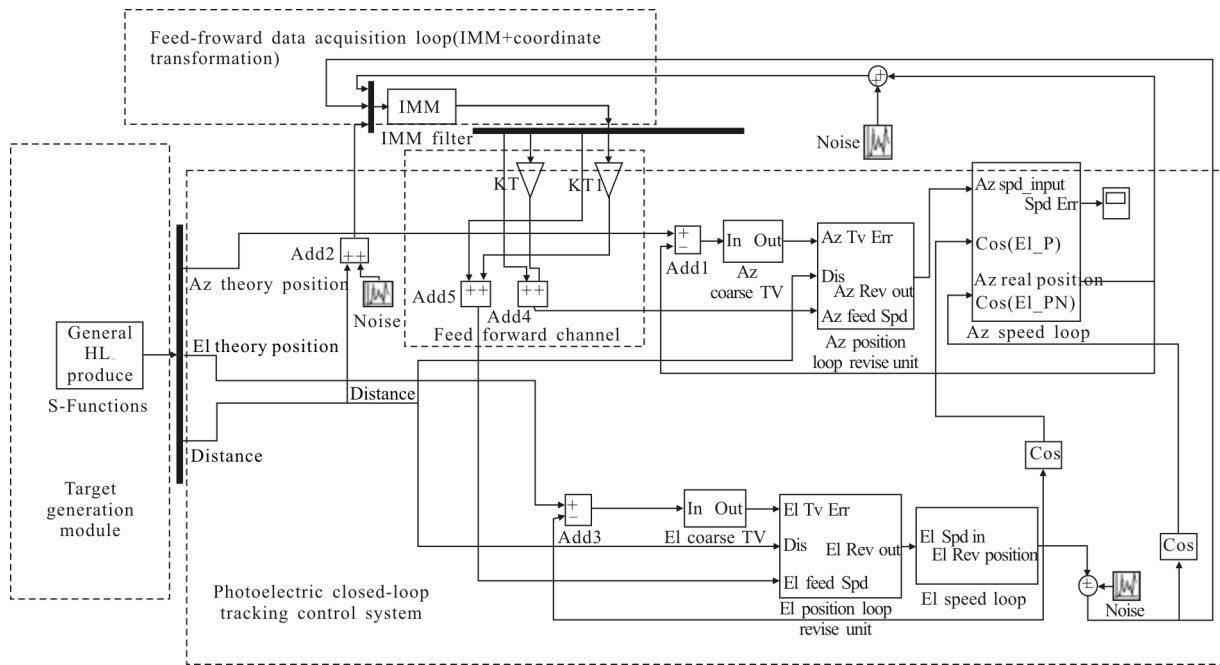


图 4 Matlab 仿真模型

Fig.4 Matlab simulation model diagram

获取回路(交互式多模型算法+坐标变换)^[7]及前馈通道。

4.1.1 光电闭环跟踪控制系统

光电闭环跟踪控制系统仿真参数采用了某型光电跟踪仪实测参数。以方位轴为例,负载转动惯量为 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;电机参数:额定转速 60 rpm,峰值扭矩 $110 \text{ N} \cdot \text{m}$,额定电压 80 V;驱动电路为 1:15 功率放大;速度环参数为 II 型系统,闭环带宽 35 Hz;位置环参数为 I 型系统,闭环带宽 2.6 Hz;速率检测单元为 1:1 检测,采样频率 1 kHz,峰值噪声 $0.1(^{\circ})/\text{s}$;目标误差检测单元为 1:1 检测,采样频率 50 Hz,延时 40 ms,

峰值噪声 0.006° 。

4.1.2 目标运动轨迹生成模块

目标运动轨迹生成模块用于在直角坐标系下生成目标运动轨迹,并把其转换到光电测量球坐标系下,该模块可生成如下 3 种目标运动轨迹。

(1) 直线匀速目标运动轨迹:起始点:(x:-10 000、y:1 000、z:1 000);X 轴速度为 1 000 m/s;Y 轴速度为零,Z 轴速度为零;

(2) 侧面蛇形机动目标运动轨迹:起始点:(x:-10 000、y:1 000、z:1 000);x 轴速度为 1 000 m/s;y 轴初始速度为零,其加速度以幅值 98 m/s²,频率

0.153 Hz 的正弦波变化; z 轴速度为零;

(3) 迎面俯冲机动目标运动轨迹:起始点:(x:0、y:10000、z:8000);x 轴速度为零;y 轴速度为 1000m/s; z 轴初始速度为零,加速度以幅值 196 m/s,频率 0.031 Hz 的正弦波变化。

4.1.3 前馈数据获取回路

前馈数据获取回路包括交互式多模型算法和坐标变换,坐标变换包括输入变换和输出变换。输入变换为光电测量球坐标系→直角坐标系的变换,该变换为交互式滤波算法提供了量测输入数据;输出变换为直角坐标系→光电测量球坐标系的变换,通过该变换交互式滤波算法在直角坐标系下输出数据被变换至光电测量球坐标系下,从而被光电跟踪控制系统作为前馈数据使用。前馈数据获取回路的核心部分是交互式多模型算法(原理图 2),下面对算法仿真时涉及的关键参数进行明确。

(1) 模型集选取

交互式多模型算法的模型集包含三个模型,扰动噪声功率谱为 100 的匀速模型-CV^[4]和两个参数相异的机动加速度非零均值时间相关模型^[4](CS1、CS2),CS1 模型机动频率为 1/60,最大加速度 70 m/s²,CS2 模型机动频率为 1/20,最大加速度 150 m/s²。

(2) 马尔科夫矩阵

马尔科夫矩阵元素定义为模型 M_i 到模型 M_j 的转移概率: $p_{ij}=p\{M(k)=M_j|M(k-1)=M_i\}$ 。取马尔科夫

$$\text{矩阵为 } \Pi = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.9 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{bmatrix}。$$

(3) 量测噪声

噪声在球坐标系下叠加,斜距噪声为峰值 5 m 的白噪声,测角噪声为跟踪控制系统跟踪误差。

(4) 前馈通道

前馈通道是滤波器输出数据叠加至闭环跟踪控制系统的通道,包含速度前馈系数和加速度前馈系数两个参数,该参数由控制系统速度环特性决定,该仿真中控制系统速度环为 1:1 反馈,其带宽约 35 Hz,则速度前馈系数 $f_1=1$,加速度前馈系数 $f_2=0.00455$ 。

4.2 仿真数据分析

常增益递推 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波器在光电跟踪控制系统中普遍采用,表 1、表 2、表 3 是 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波器与

交互式多模型算法对三种目标运动轨迹的仿真跟踪的滤波数据比较。表 4 为光电跟踪控制系统在复合控制方式中采用两种滤波算法后控制系统的仿真跟踪误差比较。

(1) 依据表 1 和表 4 知,对匀速目标仿真跟踪过程中,在目标主要运动方向 x 轴上 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波输出精度略优于交互式多模型滤波算法;采用 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法的控制系统跟踪精度略优于采用交互式多模型滤波算法控制系统。

(2) 依据表 2 和表 4 知,对蛇形机动目标跟踪过程中,交互式多模型滤波算法输出精度优于 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法;采用交互式多模型滤波的控制系统跟踪精度优于采用 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法的跟踪精度。

(3) 依据表 3 和表 4 知,对迎面俯冲目标的跟踪过程中,交互式多模型滤波算法输出精度优于 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法;采用交互式多模型滤波的控制系统跟踪精度明显优于采用 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法的控制系统。

(4) 由表 1、表 2、表 3 中过渡时间比较知,目标跟踪过程中,交互式多模型滤波算法收敛时间小于 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法。

表 1 跟踪直线匀速目标滤波器性能对比

Tab.1 Filter performance comparison of tracking straight uniform target

	$\alpha-\beta-\gamma$ filter			IMM filter		
	Mean	Sd	Tr/s	Mean	Sd	Tr/s
Error of x speed /m·s ⁻¹	0.5237	1.5662	1.5	0.4417	1.5145	0.6
Error of x acceleration/m·s ⁻²	0.1564	0.5279	1.5	0.7464	4.1072	0.36
Error of y speed /m·s ⁻¹	-4.6726	6.598	1.5	0.1548	1.6424	0.44
Error of y acceleration/m·s ⁻²	-3.7	5.9192	1.5	0.3952	2.3579	0.44
Error of z speed /m·s ⁻¹	-2.4303	3.4626	1.5	0.228	1.1826	0.66
Error of z acceleration/m·s ⁻²	-1.776	2.8594	1.5	0.3229	1.88	0.6

注:(1) Mean 为系统误差标识,Sd 为随机误差标识,Tr 为过渡时间标识。

(2) $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法过渡时间固定为 1.5 s 的原因是,该算法在过渡段和稳定段采用了不同的滤波参数,其过渡段参数的使用时长为 1.5 s。

表 2 跟踪侧面蛇形机动目标滤波器性能对比

Tab.2 Side maneuver target tracking filter performance comparison

	$\alpha-\beta-\gamma$ filter			IMM filter		
	Mean	Sd	Tr/s	Mean	Sd	Tr/s
Error of x speed/ $m \cdot s^{-1}$	-1.1244	2.6513	1.5	-0.0832	1.1279	0.98
Error of x acceleration/ $m \cdot s^{-2}$	-0.7963	2.0273	1.5	0.0069	1.0558	0.6
Error of y speed/ $m \cdot s^{-1}$	-10.276	18.9818	1.5	0.6921	6.614	1.44
Error of y acceleration/ $m \cdot s^{-2}$	-8.0187	15.4958	1.5	2.2199	8.7883	0.88
Error of z speed/ $m \cdot s^{-1}$	-2.0822	4.7798	1.5	-0.054	0.7489	1.4
Error of z acceleration/ $m \cdot s^{-2}$	-1.4757	3.7628	1.5	-0.3884	3.7024	0.5

表 3 跟踪迎面俯冲机动目标滤波器性能对比

Tab.3 Dive head-tracking maneuvering target filter performance comparison

	$\alpha-\beta-\gamma$ filter			IMM filter		
	Mean	Sd	Tr/s	Mean	Sd	Tr/s
Error of x speed $/m \cdot s^{-1}$	5.2956	5.7123	1.5	-0.7751	1.6478	1.14
Error of x acceleration/ $m \cdot s^{-2}$	3.7361	4.7741	1.5	-2.5067	4.2648	0.34
Error of y speed $/m \cdot s^{-1}$	-19.3793	20.4521	1.5	0.3112	1.2875	1.04
Error of y acceleration/ $m \cdot s^{-2}$	-14.1	17.6786	1.5	1.3322	6.2173	0.28
Error of z speed $/m \cdot s^{-1}$	-54.549	37.2652	1.5	-1.9802	5.5314	0.9
Error of z acceleration/ $m \cdot s^{-2}$	-40.956	33.8698	1.5	-2.2755	3.9125	0.3

表 4 控制系统采用不同滤波器的跟踪误差统计

Tab.4 Tracking error statistics if control system using different filters

Targe type	Movement direction	$\alpha-\beta-\gamma$ filter		IMM filter	
		Mean /mrad	Sd/mrad	Mean /mrad	Sd/mrad
Straight trajectory	AZ	-0.067 8	0.137 1	-0.099 8	0.156 4
	EL	-0.020 6	0.033 2	-0.039 9	0.042 2
Sides serpentine	AZ	-0.12	0.387 8	0.040 8	0.149 8
	EL	-0.06	0.127	-0.037 5	0.013 7
Dive trajectory	AZ	0.007 1	0.329	0.003 95	0.052 7
	EL	0.444	0.729	0.020 2	0.129 6

5 结 论

由仿真分析可知,在光电跟踪控制系统中采用交互式多模型算法较采用 $\alpha-\beta-\gamma$ 滤波算法收敛更快,适应性更好,该算法可作为光电跟踪控制系统复合控制技术前馈数据的获取算法使用,但由于滤波算法与跟踪控制系统之间影响关系非线性较强,难以定量分析,如控制系统跟踪精度下降会导致滤波器输出精度下降,滤波器输出精度下降又会导致控制系统跟踪精度下降,所以在控制系统设计及滤波器设计时需要针对使用要求,通过仿真充分验证滤波器及控制系统的性能,以确保系统具有足够的稳定性。

参考文献:

- [1] Ma Jianguang. The basic technical problem of the capture tracking and aiming system[J]. *Optics Engineering*, 1989, 16(3): 1-41. (in Chinese)
马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. *光学工程*, 1989, 16(3): 1-41.
- [2] Lu Peiguo, Shou Shaojun. High accuracy tracking technology and its application in ship-brone electro-optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 480-483. (in Chinese)
陆培国, 寿少峻. 舰载光电系统高精度跟踪控制技术[J]. *应用光学*, 2006, 27(6): 480-483.
- [3] Song Jiangpeng, Sun Guangli, Zhou Di, et al. Line-of-sight stabilization and modeling analysis of bias shafting mirror platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2484-2490. (in Chinese)
宋江鹏, 孙广利, 周荻, 等. 偏轴反射镜平台视轴稳定技术及建模分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2484-2490.
- [4] Gao Yunguo, Wang Chao, Jiang Zhanhong, et al. Re-orientation accuracy of vehicle-born photoelectric tracking equipment [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(5): 1322-1330. (in Chinese)
高云国, 王超, 江展洪, 等. 光电跟踪设备载车平台的重复定位精度[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1322-1330.
- [5] Xu Junhao, Gao Yajie, Yang Guoqing. Analysis and study of model set selection in interacting multiple model algorithm [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2004, 25(4): 352-356. (in Chinese)
徐建豪, 高彦杰, 杨国庆. 交互式多模型算法中模型集选择的分析研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(4): 352-356.
- [6] Blom H A P, Bar Shalom Y. The interacting multiple model

- algorithm for systems with Markovian switching coefficients [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(8): 780–783.
- [7] Xue Dingyu, Chen Yangquan. MATLAB Solutions to Mathematical Problems in Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
薛定宇, 陈阳泉. 控制数学问题的 MATLAB 求解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [8] Liu Xiaoqiang, Shou Shaojun, Song Xiaoming, et al. Application of indirect-stabilization on two-axis optoelectronic tracker[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011 (10): 95–98. (in Chinese)
刘小强, 寿少峻, 宋晓明, 等. 捷联稳定技术在两轴光电跟踪仪中的应用[J]. 光电工程, 2011(10): 95–98.
- [9] Gene F F, J David Powell, Abbas Emami-Naeini. Feedback Control of Dynamic Systems[M]. NJ: Prentice Hall, 2006.
- [10] Liu Yingxia, Wang Weigu, Chen Jian. Position arithmetic for a vehicular inertial stabilized platform[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 537–543. (in Chinese)
刘廷霞, 王伟国, 陈健. 车载惯性平台稳定位置解算算法 [J]. 中国光学, 2012, 5(5): 537–543.
- [11] Chen Zhaobing, Guo Jin, Wang Bing, et al. Operational efficiency evaluation of vehicle carrying and high supporting optic-electronic detecting system [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(1): 77–86. (in Chinese)
陈兆兵, 郭劲, 王兵, 等. 车载高架式光电探测系统作战效能评估[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 77–86.
- [12] Sun Hui. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912–918. (in Chinese)
孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析 [J]. 中国光学, 2013, 6(6): 912–918.
- [13] Fan Xinming, Cao Jianzhong, Yang Hongtao, et al. Application of improved particle-swarm-optimization in stabilized platform based on multiple reference frame model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (8): 2395 – 2400. (in Chinese)
范新明, 曹剑中, 杨洪涛, 等. 改进粒子群优化在稳定平台多空间分析模型的应用 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2395–2400.