

光电跟踪平台脱靶量滞后补偿方法

吕明明, 侯润民, 柯于峰, 侯远龙

(南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京)

摘要: 针对光电跟踪平台在跟踪目标时存在脱靶量滞后的问题,设计了一种基于非线性跟踪微分器和机动目标“当前”统计模型的滞后补偿方法。根据光电跟踪平台中目标脱靶量的产生机理,将脱靶量滞后等效为纯延迟环节和采样保持环节的串联,利用非线性跟踪微分器得到滞后脱靶量的跟踪信号及其微分信号。在此基础上,采取直接预测补偿法处理延迟环节,从而估计出不含延迟的脱靶量信号,并利用滞后脱靶量和跟踪信号的间距自适应调整非线性跟踪微分器的参数。根据机动目标的“当前”统计模型建立离散状态方程,采用修正的瑞利分布描述目标加速度的“当前”概率密度,从而估计在采样保持阶段的目标脱靶量,实现对采样保持环节的补偿。实验结果表明:所提方法将单位阶跃响应的超调量由基于自适应最小均方差补偿方法及基于卡尔曼滤波补偿方法的19.4%和13.7%降低至2.5%;所提方法能有效补偿延迟环节和采样保持环节,提高光电跟踪平台的目标跟踪精度。

关键词: 光电跟踪平台;脱靶量滞后;非线性跟踪微分器;直接预测补偿;“当前”统计模型

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0141-07

Compensation Method for Miss Distance Time-Delay of Electro-Optical Tracking Platform

LÜ Mingming, HOU Runmin, KE Yufeng, HOU Yuanlong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of miss distance time-delay of electro-optical tracking platform in target tracking, a time-delay compensation method based on non-linear tracking differentiator and current statistical model of maneuvering target is proposed. According to the mechanism of miss distance, the time-delay is equivalent to the series connection of the pure delay component and the sampling-and-holding component. The tracking and differential signals of the miss distance with time-delay are obtained by the non-linear tracking differentiator, the miss distance without time-delay is thus estimated by the direct forecasting compensation. The parameters of the non-linear tracking differentiator are adaptively adjusted by the signal spacing evaluated with the miss distance and its tracking signal. Then the current statistical model is employed to establish the discrete state equation, and the modified Rayleigh distribution is used to describe the current probability density of the target acceleration, so as to estimate the miss distance during the sampling-and-holding. Experimental results show that the overshoot of unit step response is reduced from 19.4% (least mean square method) and 13.7% (Kalman filter method) to 2.5%.

So the proposed method can effectively compensate the delay and sampling-and-holding component, reduce the effect of miss distance time-delay, and improve the tracking accuracy of electro-optical tracking platform.

Keywords: electro-optical tracking platform; miss distance time-delay; non-linear tracking differentiator; direct forecasting compensation; current statistical model

光电跟踪平台通常利用可见光或红外图像跟踪器及伺服控制系统,来实现对目标的自动跟踪^[1],广泛应用于火控、制导、靶场测试和激光通信等领域^[2]。图像跟踪器根据所采集图像来计算目标相对视轴的偏差,即脱靶量,并结合光电平台的测角或测速传感器计算目标实际位置和速度。伺服控制系统以此来控制光电平台机构往偏差减小的方向运动,使目标始终处于视场中央。图像跟踪器在计算脱靶量时,需要经过图像信号的建立和处理、由跟踪算法提取目标位置以及信号传输等环节,因此脱靶量输出往往滞后于目标实际成像时间^[3]。光电跟踪平台的主要任务就是捕捉和跟踪目标,而脱靶量的滞后会引起系统的超调和振荡,降低目标跟踪的精度,甚至导致目标捕捉和跟踪的失败。

由脱靶量的产生机理及处理过程可知,解决其滞后问题可以从以下3方面考虑:提高图像采集帧频,减少图像跟踪算法运算时间,利用预测模型直接或间接估计目标位置。伺服控制系统的输入是脱靶量与平台位置的合成值,因此用于脱靶量滞后的预测补偿分为合成前预测和合成后预测。合成前预测是指通过滞后脱靶量直接估计目标不含滞后的脱靶量,再将预测值与平台位置合成^[4-6],而合成后预测是指先人为将平台传感器的反馈值延迟,使其与脱靶量在时间轴上保持一致,再通过合成值进行估计伺服控制系统的输入值^[7]。

脱靶量滞后是光电跟踪系统中不可忽视的问题,如何进行补偿一直是国内外研究的热点。文献[4]利用线性Pade逼近分析光电成像传感器的纯延迟,并采用卡尔曼滤波的多步预测法来补偿脱靶量滞后。文献[5]提出自适应卡尔曼滤波算法的模型,用其估计目标角速度,并前馈到速度回路,实现光电跟踪平台的复合控制。文献[6]针对光电平台跟踪器延迟,采用基于自适应最小均方差(LMS)算法,结合图像信息和无人机信息,实现对控制信号的有效预测。文献[8]建立基于鲁棒 H^∞ 滤波算法的“当前”统计模型,解决图像跟踪器的脱靶量滞后和信号噪声问题。文献[9]提出脱靶量延迟具有不确定有界时变的特性,并在此基础上利用基于统计 Singer

模型和 H^∞ 控制对滞后进行补偿。上述文献均采用合成前预测,而文献[7]作为典型的合成后预测法,提出人为将光电平台的测角传感器信号延迟再与脱靶量合成,之后使用卡尔曼滤波进行外推,解决了脱靶量滞后问题。

非线性跟踪微分器(NTD)是由中国科学院韩京清研究员等针对微分信号的精确提取所设计^[10],可以较好地跟踪被噪声污染的输入信号,同时利用积分运算提取其近似微分信号,目前已在信号滤波^[11]和微分信号提取^[12]等方面广泛应用。本文在将脱靶量滞后等效为纯延迟环节和采样保持环节的串联的基础上,分别利用直接预测补偿法和机动目标的“当前”统计模型(CSM)进行补偿,其中,直接预测补偿法估计无滞后脱靶量的前提是利用NTD提取滞后脱靶量的跟踪及微分信号。

1 脱靶量滞后问题描述

光电跟踪平台的主要任务是捕捉、锁定和跟踪目标。光电跟踪平台的工作示意图如图1所示,其主要由图像跟踪器、伺服控制系统和平台负载等构成。在自动跟踪目标时:图像跟踪器通过采集的图像计算目标脱靶量,并与平台位置合成;伺服控制系统将合成值作为输入信号,形成随动控制系统,控制平台机构往脱靶量减小的方向运动,从而让视轴始终指向目标。

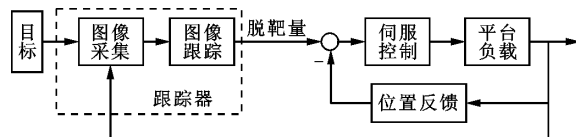
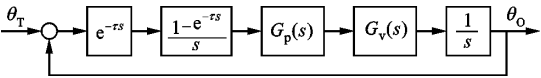


图1 光电跟踪平台工作示意图

在脱靶量计算过程中,可见光或红外传感器生成图像、目标跟踪算法运行、数据传输等环节都需要一定的时间,使得伺服控制系统得到的脱靶量严重滞后于目标当前位置,这对系统的稳定性和跟踪精度都有着不利的影响。考虑脱靶量延迟的跟踪系统结构图如图2所示,脱靶量滞后相当于在伺服控制系统的位置回路中串联了一个纯延迟环节和采样保持环节。



θ_T : 目标位置; θ_0 : 平台反馈位置; τ : 脱靶量滞后时间;
 τ_0 : 采样保持时间; $G_p(s)$: 位置校正环节; $G_v(s)$: 速度
回路的等效传递函数; s : 拉普拉斯变换的复变量
图 2 考虑脱靶量延迟的跟踪系统结构图

文献[13]在假设脱靶量滞后时间为一帧时间的前提下,进一步推导了图像跟踪器的帧频与位置带宽之间的关系,公式为

$$f_T = \frac{540 f_P}{\theta_0 - \theta_1} \tag{1}$$

式中: f_T 为图像跟踪器帧频; f_P 为位置带宽; θ_0 为不考虑滞后的位置环相角裕度; θ_1 为引入滞后的相角裕度。由此可知,脱靶量作为伺服控制系统位置回路的误差比较环节,其滞后严重影响了控制系统的相位裕度,导致系统超调量的增加和位置环最大带宽的降低,使跟踪系统会产生振荡,降低了跟踪精度,甚至会导致目标捕捉和跟踪的失败。

2 基于 NTD 和 CSM 的补偿方法

2.1 非线性跟踪微分器

非线性跟踪微分器是自抗扰控制器的重要组成部分,设计的初衷是从不连续或带有随机噪声的信号中提取连续信号和微分信号^[12]。

令 z_2 为信号 z_1 的微分信号,构建系统^[10]为

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= f(z_1, z_2) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

若式(2)的所有解(按菲利波夫意义)都有界,且满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z_1(t) = 0; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} z_2(t) = 0 \tag{3}$$

那么对任意有界可测信号 $v(t), t \in [0, \infty)$ 和任意 $T > 0$,有微分方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= R^2 f\left(x_1 - v(t), \frac{x_2}{R}\right) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中: x_1 为 v 的跟踪信号; x_2 为 x_1 的微分信号。 $x_1(R, t)$ 满足

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |x_1(R, t) - v(t)| dt = 0 \tag{5}$$

通过选择适当的非线性函数 $f(\cdot)$ 和参数 R , 使 $x_1(t)$ 充分逼近输入信号 $v(t)$, 同时得到输入信号广义导数的一种光滑逼近信号 $x_2(t)$ 。NTD 通过积分运算得到输入信号的微分形式,避免了传统差分带来的噪声放大效应。文献[10]给出了 NTD 的严格数学证明。理论上,通过多个 NTD 的串联,可

以得到输入信号 $v(t)$ 的二阶或更高阶微分信号^[11]。

采用不同的离散方法,NTD 会有不同的形式。常用的基于欧拉法的 NTD 离散形式^[14]为

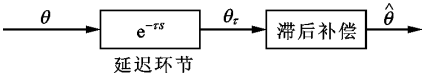
$$\left. \begin{aligned} y &= L(x_1(k) - v(k), x_2(k), r_0, h_0) \\ x_1(k+1) &= x_1(k) + h x_2(k) \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + h y \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: $v(k)$ 为输入信号; h 为步长,由系统运算周期决定; h_0 和 r_0 分别为滤波因子和速度因子,影响 NTD 的滤波性能和跟踪速度,通过设置合理的 h_0 和 r_0 ,可以得到输入信号 $v(k)$ 的跟踪及微分信号,通常将 h_0 取为 h 的若干整数倍^[14]; $L(\Delta x, x_2, r_0, h_0)$ 为最速综合函数,计算式为

$$\left. \begin{aligned} d &= r_0 h_0^2 \\ a_0 &= h_0 x_2 \\ y &= \Delta x + a_0 \\ a_1 &= \sqrt{d(d+8|y|)} \\ a_2 &= a_0 + [(a_1 - d)/2] \operatorname{sgn} y \\ s_y &= [\operatorname{sgn}(y+d) - \operatorname{sgn}(y-d)]/2 \\ a &= (a_0 + y - a_2) s_y + a_2 \\ s_a &= [\operatorname{sgn}(a+d) - \operatorname{sgn}(a-d)]/2 \\ y &= -r_0 [a/d - \operatorname{sgn} a] s_a - r_0 \operatorname{sgn} a \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

2.2 延迟环节补偿

卡尔曼滤波是光电跟踪平台常用的脱靶量滞后补偿方法^[15-17],然而卡尔曼滤波需要假设信号动态性能及噪声统计特性已知,但实际情况并不能完全满足^[18],限制了补偿效果。本文采用直接预测法补偿延迟环节,其补偿原理如图 3 所示。



θ : 目标脱靶量; θ_τ : 滞后脱靶量; $\hat{\theta}$: 补偿后的脱靶量
图 3 脱靶量滞后补偿原理

目标脱靶量 θ 经过延迟环节后为 $\theta_\tau, \theta_\tau = \theta e^{-\tau}$ 。直接预测补偿法采用 e^τ 及其泰勒展开式对 $e^{-\tau}$ 进行补偿,补偿后的估计信号 $\hat{\theta}$ 可表示为

$$\hat{\theta} = \theta_\tau e^\tau \approx \theta_\tau (1 + \tau s) = \theta_\tau + \tau s \theta_\tau = \theta_\tau + \dot{\theta}_\tau \tag{8}$$

式中 $\dot{\theta}_\tau$ 为滞后脱靶量 θ_τ 的微分信号。

由式(8)可知,想要利用直接预测法补偿滞后脱靶量,就需要首先提取滞后脱靶量的跟踪及微分信号。直接通过差分得到的微分信号存在噪声放大效应,并且滞后时间越小,噪声放大越严重,完全可能淹没微分信号^[19]。因此,采用式(6)(7)计算滞后脱靶量的跟踪及微分信号。

结合式(6)(8),可得出基于NTD的滞后脱靶量直接预测补偿表达式为

$$\left. \begin{aligned} y &= L(\theta_1(k) - \theta_\tau(k), \theta_2(k), r_0, h_0) \\ \theta_1(k+1) &= \theta_1(k) + h\theta_2(k) \\ \theta_2(k+1) &= \theta_2(k) + h y \\ \hat{\theta}(k) &= \theta_1(k) + \lambda\tau\theta_2(k) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: λ 为预测因子,可预先设定;速度因子 r_0 决定了跟踪速度的快慢, r_0 越大跟踪速度越快,但引入的随机噪声也会越大;滤波因子 h_0 影响着滤波效果,实际上NTD的滤波效果与 h_0 的开方成反比^[20],但 h_0 过大会增加相位的损失,因此参数调整要综合考虑两方面的性能。

由于目标机动性的增强,光电跟踪平台必须根据被跟踪目标的变化实时调整NTD参数,以得到精准的跟踪及微分信号,从而获得满意的脱靶滞后补偿效果。当跟踪信号 x_1 和输入信号 v 的间距充分小时,其微分数值充分接近^[21],因此可以用间距来调整NTD的参数。进一步,为了降低信号随机误差的影响,采用前 M 个信号的间距均值来自适应调整 r_0 和 h_0 ,计算式为

$$\left. \begin{aligned} r_0(k+1) &= r_0(k) + \frac{k_{r_0}}{M} \sum_{i=k-M+1}^k [v(i) - x_1(i)] \\ h_0(k+1) &= h_0(k) + \frac{k_{h_0}}{M} \sum_{i=k-M+1}^k [v(i) - x_1(i)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: M 为参考的周期数; k_{r_0} 和 k_{h_0} 分别为速度因子 r_0 和滤波因子 h_0 的控制增益系数,需要预先设定。

2.3 采样保持环节补偿

CSM是一种描述目标机动特性的实用模型,其假定目标在下一时刻的加速度有限,只能是在“当前”时刻加速度的邻域内^[5]。CSM的离散状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k)\bar{a}(k+1) + \mathbf{W}(k) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X}(k)=[x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k)]$ 为目标状态向量; $\mathbf{F}(k)$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{U}(k)$ 为输入控制矩阵; $\bar{a}(k+1)$ 为加速度均值,取值为上一时刻加速度的估计值,在一个周期内视其为常数; $\mathbf{W}(k)$ 为均值为0的白噪声,其方差 $\mathbf{Q}(k)$ 表达式为

$$\mathbf{Q}(k) = 2\alpha\sigma_a^2\mathbf{Q}(k-1) \quad (12)$$

其中 α 为机动频率, σ_a^2 为加速度方差。

CSM采用实时修正的瑞利分布描述加速度的“当前”概率密度, σ_a^2 调整公式为

$$\sigma_a^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi}[a_{+\max} - \bar{a}(k)]^2, & \bar{a}(k) > 0 \\ \frac{4-\pi}{\pi}[a_{-\max} - \bar{a}(k)]^2, & \bar{a}(k) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中 $a_{+\max}$ 和 $a_{-\max}$ 分别为机动目标的最大正负加速度。

实际光电跟踪平台中,图像跟踪器帧频不超过100 Hz,远小于平台位置反馈采样频率(约800 Hz)^[13]。在计算相邻两次脱靶量期间,系统会有 N 个平台传感器的反馈数据,相当于伺服控制系统中包含一个采样保持环节,且

$$N = \left\lceil \frac{\tau_0}{T} \right\rceil \quad (14)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为取整函数; T 为平台位置反馈采样周期。

本文利用式(11)估计在采样保持期间每个系统周期的脱靶量,其中 $k=1,2,\dots,N$,此时 $\mathbf{F}(k)$ 和 $\mathbf{U}(k)$ 表达式详见文献[22]。

3 验证实验与结果

3.1 延迟环节补偿实验

为了验证本文所提出的脱靶量滞后补偿方法中延迟环节的补偿效果,假定目标以 $\theta=10\sin(0.8t)$ 做等效正弦运动,对输入信号人为延迟并补偿,进行了25 s的仿真实验。NTD的参数设定如下: $h=0.00125$ s, $r_0=1000$, $h_0=0.015$,并根据式(10)实时调整 r_0 和 h_0 , $M=5$, $k_{r_0}=0.1$, $k_{h_0}=0.1$, $\tau=0.03$ s。

图4是NTD跟踪及延迟环节补偿结果,可以定性地看出,跟踪信号能够很好地跟踪滞后的脱靶量,直接预测法利用滞后跟踪信号和微分信号,很好地还原了目标输入信号,实现了延迟环节的补偿。图5是NTD跟踪及延迟环节的误差,通过定量分析可知,除了在初始阶段因信息量不足出现较大误差外,其余时间的跟踪误差范围是 $[-0.24^\circ, 0.24^\circ]$,脱靶量延迟环节的补偿误差范围是 $[-0.15^\circ, 0.29^\circ]$ 。进一步,计算出跟踪误差的均方根误差为 0.18° ,补

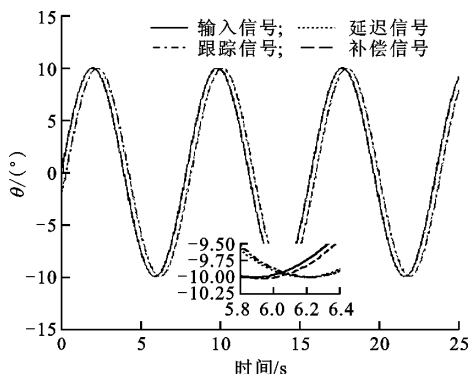


图4 NTD跟踪及延迟环节的补偿结果

偿误差的均方根误差为 0.21° 。

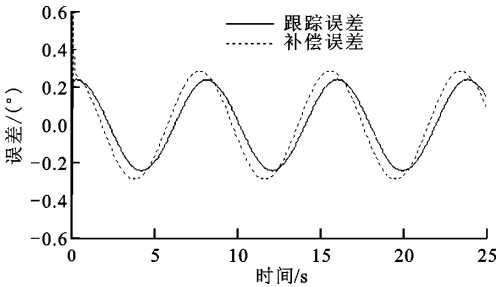


图 5 NTD 跟踪及延迟环节的误差

3.2 采样保持环节补偿实验

将 3.1 节中脱靶量延迟补偿后的信号作为输入信号,进行 25 s 的仿真实验。采样保持环节补偿的参数设置如下: $T=0.001\ 25\text{ s}$;采样保持周期为 0.03 s ;式(12)中的机动频率 $\alpha=0.001\text{ s}^{-1}$;式(13)中的 $a_{+\max}=0.64\text{ (}^{\circ}\text{)}/\text{s}^2$, $a_{-\max}=-0.64\text{ (}^{\circ}\text{)}/\text{s}^2$ 。

图 6 是采样保持环节的补偿效果。可以看出,本文方法在采样保持期间,很好地跟踪了输入信号,能够符合目标的机动规律。图 7 是采样保持环节的补偿误差,可定量分析出采样保持环节的补偿误差范围为 $[-0.54^{\circ}, 0.65^{\circ}]$,均方根误差为 0.16° 。

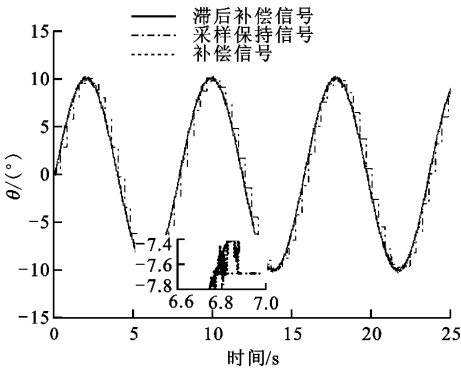


图 6 采样保持环节的补偿效果

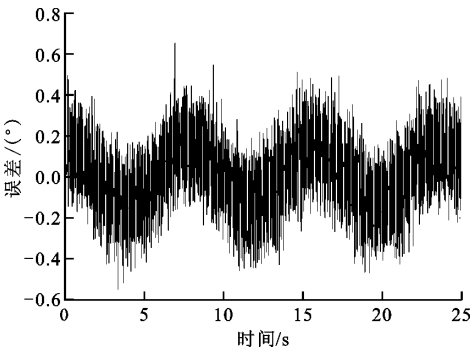


图 7 采样保持环节的补偿误差

3.3 综合补偿实验

以某型光电跟踪平台的高低方向进行实验,模型结构如图 2 所示,其中位置校正环节 $G_p(s)$ 和速

度回路等效传递函数 $G_v(s)$ 分别为

$$G_p(s) = \frac{3\ 890(0.42s + 1)(0.23s + 1)}{(4.25s + 1)(6.75s + 1)} \quad (15)$$

$$G_v(s) = \frac{2\ 080(0.1s + 1)(0.0065s + 1)}{(6.2s + 1)(0.003s + 1)} \quad (16)$$

采用基于卡尔曼滤波(Kalman)和基于自适应 LMS 的补偿方法,与本文提出的基于非线性跟踪微分器与“当前”统计模型的补偿方法(NTD-CSM)进行对比,单位阶跃响应的超调量和调节时间的对比如表 1 所示,单位阶跃响应前 3 s 的曲线如图 8 所示。可以看出:3 种方法的调节时间相差不多,体现了光电跟踪平台在目标出现时快速准确的捕捉性能,NTD-CSM 补偿法阶跃响应基本无超调,远小于 Kalman 和 LMS 两种方法。

表 1 单位阶跃响应的结果对比

补偿方法	超调量/%	调节时间/s
LMS	19.4	1.76
Kalman	13.7	1.72
NTD-CSM	2.5	1.64

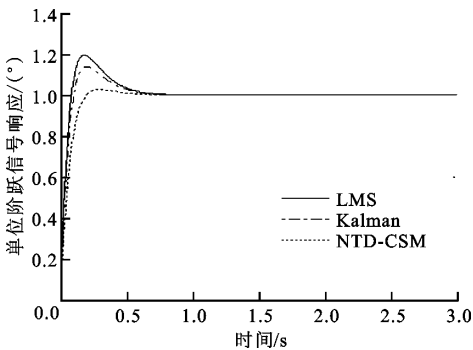


图 8 3 种方法单位阶跃响应曲线的比较

为验证所设计的脱靶量滞后补偿方法在目标跟踪上的表现,仍在该平台上假定目标以 $\theta=10\sin(0.8t)$ 做等效正弦运动,并加入幅值为 1° 的随机噪声,同样进行了 25 s 仿真实验。图 9 是 3 种方法的目标跟踪曲线,可以看出,LMS 的误差范围为 $[-0.44^{\circ},$

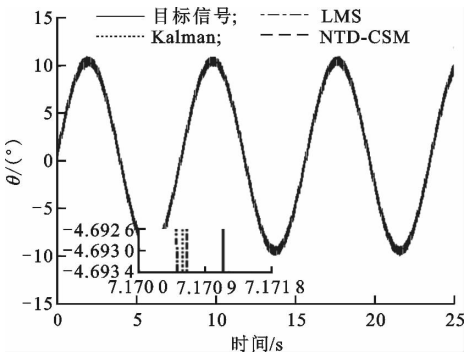


图 9 3 种方法目标跟踪曲线的比较

0.52°], Kalman 的误差范围为 $[-0.49^\circ, 0.58^\circ]$, NTD-CSM 的误差范围为 $[-0.33^\circ, 0.47^\circ]$ 。图 10 给出了 3 种方法的均方根误差曲线, 为了突出比较结果, 只取前 2 s 的均方根误差数据绘制曲线, 可以明显看出, NTD-CSM 的跟踪精度优于 Kalman 和 LMS 的。

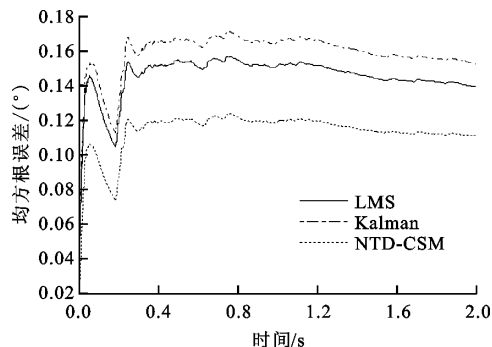


图 10 3 种方法均方根误差曲线的比较

4 结 论

(1) 本文提出了一种用于解决光电跟踪平台中目标脱靶量滞后的补偿方法。根据脱靶量滞后可以等效为纯延迟环节和采样保持环节, 分别采用非线性跟踪微分器和机动目标“当前”统计模型进行补偿。

(2) 借助非线性跟踪微分器获取脱靶量滞后信号的跟踪信号和微分信号, 并采用直接预测补偿法进行延迟环节的补偿。由实验可知, 跟踪信号及补偿信号的均方根误差分别为 0.18° 和 0.21° 。

(3) 建立机动目标“当前”统计模型的离散状态方程, 并采用修正的瑞利分布描述加速度的“当前”概率密度, 从而实现采样保持环节的补偿。实验分析表明, 采样保持环节补偿的均方根误差为 0.16° 。

(4) 建立综合补偿实验模型, 对比所提方法与基于自适应方差的补偿方法及基于卡尔曼滤波的补偿方法。在不影响调节时间的前提下, 单位阶跃响应的超调量由 19.4% 和 13.7% 降低至 2.5%。在实际应用中应综合考虑超调量和调节时间。

参考文献:

- [1] YADEGAR M, KARAMI F, NOBARI J H. A new control structure to reduce time delay of tracking sensors by applying an angular position sensor [J]. ISA Transactions, 2016, 63: 133-139.
- [2] 官伯林, 贾建援, 朱应敏. 一种快速三轴全方位光电跟踪策略 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(2): 76-

82.

GUAN Bolin, JIA Jianyuan, ZHU Yingmin. High-speed tracking strategy for three-axis photoelectric tracking system in whole space [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(2): 76-82.

- [3] 杨宏韬. 基于多信息源数据融合的光电跟踪系统精度提高方法的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 8-52.
- [4] 岳玉芳. 光电跟踪系统传感器延迟及控制算法研究 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(7): 2868-2873.
YUE Yufang. Research of delay of sensor and control algorithms in opto-electronic tracking system [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(7): 2868-2873.
- [5] 田俊林, 胡晓阳, 游安清. 利用自适应卡尔曼滤波实现光电跟踪中的复合控制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1941-1947.
TIAN Junlin, HU Xiaoyang, YOU Anqing. Compound control of photoelectric tracking by using adaptive Kalman filtering algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1941-1947.
- [6] 张静, 王宏伦, 盖文东. 基于自适应估计的光电平台目标跟踪方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(12): 1465-1468.
ZHANG Jing, WANG Honglun, GAI Wendong. Ground target tracking method research based on adaptive estimation for electro-optical platform [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(12): 1465-1468.
- [7] 李文军, 陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 279-284.
LI Wenjun, CHEN Tao. Equivalent combined control technique based on Kalman filter [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 279-284.
- [8] JI W, LI Q, XU B, et al. Maneuvering targets state prediction based on robust H^∞ filtering in opto-electronic tracking system [J]. Signal Processing, 2010, 90(6): 2002-2008.
- [9] 谢瑞宏. 机载光电平台伺服系统稳定与跟踪控制技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 61-75.
- [10] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器 [J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking-differentiator [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1994, 14(2): 177-183.
- [11] 武利强, 林浩, 韩京清. 跟踪微分器滤波性能研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 651-652, 670.

- WU Liqiang, LIN Hao, HAN Jingqing. Study of tracking differentiator on filtering [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 651-652, 670.
- [12] 万慧, 齐晓慧. 跟踪-微分器输出信号相位损失影响因素分析 [J]. 系统科学与数学, 2017, 37(3): 665-673. WAN Hui, QI Xiaohui. Analysis on affected factors on phase loss of output signals based on tracking-differentiator [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2017, 37(3): 665-673.
- [13] 王婉婷. 基于高精度辨识的复合轴控制策略研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 45-63.
- [14] 朱斌. 自抗扰控制入门 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017: 30-47.
- [15] 杨秀华, 吉桐伯, 陈涛. 卡尔曼滤波器在光电经纬仪中的应用 [J]. 测试技术学报, 2003, 17(4): 324-328. YANG Xiuhua, JI Tongbo, CHEN Tao. Application of Kalman filter in photoelectric theodolite [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2003, 17(4): 324-328.
- [16] 王秋平, 陈娟, 王显利, 等. 电视跟踪系统的复合控制延迟卡尔曼滤波算法 [J]. 测试技术学报, 2008, 22(1): 74-79. WANG Qiuping, CHEN Juan, WANG Xianli, et al. The delay Kalman filter algorithm in compound control for TV tracking systems [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(1): 74-79.
- [17] CHEN J, WANG Q P, CHEN J. Kalman filter for pointing deviation delay compensation in a TV tracker [C]// 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 43-45.
- [18] 吕明明, 刘荣忠, 侯远龙, 等. 一种光电跟踪平台共轴控制的目标运动滤波方法 [J]. 兵工学报, 2019, 40(3): 548-554. LÜ Mingming, LIU Rongzhong, HOU Yuanlong, et al. A target motion filtering method for on-axis control of electro-optical tracking platform [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(3): 548-554.
- [19] 朱枫, 张葆, 李贤涛, 等. 跟踪微分器在陀螺信号去噪方面的应用 [J]. 中国光学, 2017, 10(3): 355-362. ZHU Feng, ZHANG Bao, LI Xiantao, et al. Application of tracking differentiator to gyro signal denoising [J]. Chinese Optics, 2017, 10(3): 355-362.
- [20] 韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 46-110.
- [21] 张帆, 徐华中, 向云, 等. 针对含噪信号的自适应跟踪微分器改进研究 [J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 60-63, 101. ZHANG Fan, XU Huazhong, XIANG Yun, et al. Improvement on adaptive tracking differentiator for noisy signal [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(3): 60-63, 101.
- [22] 孙福明. 机动目标跟踪状态估计与数据关联技术的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 13-23.

(编辑 陶晴 刘杨)

(上接第 140 页)

- [14] BOADA B L, BOADA M J L, DIAZ V. Vehicle side-slip angle measurement based on sensor data fusion using an integrated ANFIS and an unscented Kalman filter algorithm [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72/73: 832-845.
- [15] LI X, CHAN C Y, WANG Y. A reliable fusion methodology for simultaneous estimation of vehicle sideslip and yaw angles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4440-4458.
- [16] 李刚, 王野, 宗长富. 四轮轮毂电机电动汽车行驶状态估计 [J]. 汽车工程, 2018, 40(2): 150-155. LI Gang, WANG Ye, ZONG Changfu. Driving state estimation of electric vehicle with four-wheel-hub-motors [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(2): 150-155.
- [17] MAURICE J P, BERZERI M, PACEJKA H B. Pragmatic tyre model for short wavelength side slip variations [J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 31(2): 65-94.
- [18] 于长官. 现代控制理论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 84-85.

(编辑 陶晴 荆树蓉)