

控制与决策

Control and Decision

IMM Kalman滤波前馈补偿技术在搜索跟踪系统中的应用

林梯, 吴易明, 朱帆

引用本文:

林, 吴易明, 朱帆. IMM Kalman滤波前馈补偿技术在搜索跟踪系统中的应用[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1253–1258.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1103>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于和声差分进化的UKF改进算法

Improved UKF algorithm based on harmony search differential evolution

控制与决策. 2018, 33(4): 614–620 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0337>

基于通信与观测联合优化的多无人机协同目标跟踪控制

Co-optimization of communication and observation for multiple UAVs in cooperative target tracking

控制与决策. 2018, 33(10): 1747–1756 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0727>

压电微定位平台神经网络与专家模糊复合控制方法

Hybrid control for piezoelectric micro positioning platform based on BP neural network and expert fuzzy control

控制与决策. 2018, 33(1): 95–100 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1289>

区间量测下基于无迹变换的伯努利粒子滤波算法

Bernoulli particle filter algorithm based on unscented transformation in interval measurement

控制与决策. 2017, 32(8): 1523–1527 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0661>

轨迹跟踪级联机器人编队控制方法

Trajectory tracking cascade robot formation control

控制与决策. 2016(2): 317–323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1676>

线性多变量系统有限时间最优解耦控制

Finite-time optimal decoupling control for linear multi-variable systems

控制与决策. 2016, 31(12): 2271–2274 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1231>

考虑铁损的异步电动机模糊自适应命令滤波反步控制

Fuzzy approximation-based adaptive command filtered backstepping control for induction motors with iron losses

控制与决策. 2016, 31(12): 2189–2194 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1587>

基于CKF的分布式滤波算法及其在目标跟踪中的应用

Distributed algorithm-based CKF and its applications to target tracking

控制与决策. 2015(2): 296–302 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1356>

IMM Kalman 滤波前馈补偿技术在搜索跟踪系统中的应用

林 蓓^{1,2†}, 吴易明¹, 朱 帆¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 空中低慢小目标存在机动和角速率运动较大的情况, 对地面搜索跟踪系统的跟踪精度提出很高要求, 为了提高跟踪系统的跟踪精度, 需加入伺服前馈补偿技术, 精确的目标速度和加速度估计成为前馈补偿控制的难点. 鉴于此, 提出采用 IMM 卡尔曼滤波技术估计目标运动速度和加速度信息, 并作为伺服前馈补偿的输入量, 以消除由于目标速度和加速度运动引起的脱靶量误差. 实际系统测试实验表明, 搜索跟踪系统采用 IMM 卡尔曼滤波前馈补偿技术使得系统跟踪精度较常规卡尔曼滤波补偿提高 3 倍以上, 模型验证有效.

关键词: IMM 卡尔曼滤波; 前馈补偿; 低慢小目标; 搜索跟踪

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Implementation of IMM Kalman filtering feed-forward compensation technology in search and track systems

LIN Di^{1,2†}, WU Yi-ming¹, ZHU Fan¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The UAV has large maneuver and angular velocity motions, which puts high requirements on the servo tracking accuracy of the ground search and tracking system. In order to improve the tracking accuracy of the ground search and tracking system, servo feed-forward compensation technology is often added. Accurate target velocity and acceleration estimation becomes the difficulty of feed-forward compensation control. IMM Kalman filtering is used to estimate the velocity and acceleration information of the target, and it is used as the input of servo feed-forward compensation system to eliminate the miss distance error caused by the velocity and acceleration of the target. The actual system test results show that the tracking accuracy of the search and tracking system is more than three times higher than that of the conventional Kalman filter compensation by using the IMM Kalman filter feed-forward compensation technology, and the model verification is effective.

Keywords: IMM Kalman filtering; feed-forward compensation technology; low-altitude show and small target; search and track systems

0 引言

随着反恐和安保形势的变化, 空中威胁已经成为一个必须防范的方面. 城市空中安保面临的空中威胁往往是所谓的“低慢小”目标, 固定翼目标机动飞行的速度可达 30~50 m/s, 飞行角速度较大, 且存在机动^[1-12], 这种情况下一般采用复合控制提高地面跟踪系统的跟踪精度. 复合控制系统是在双闭环控制系统基础上通过增加开环控制支路改进得到的高精度控制系统, 如图 1 所示. 在数字引导方式下, 前馈开环控制支路 $F(s)$ 用来提供跟踪目标信号的一阶导数(速度)、二阶导数(加速度)等信息作用于速度回路^[13], 相当于将单输入单输出 SISO 系统变为多输入

单输出 MISO 系统, 有利于提高系统性能. 若前馈控制支路的校正形式与速度闭环回路满足一定关系, 理论上便可达到无误差的跟踪.

常用对 $X_i(s)$ 直接微分的方式获取目标信号的一阶导数和二阶导数, 直接微分会在控制系统中引入噪声, 对控制回路带来不利影响. 也有学者采用单一的卡尔曼滤波器估计目标速度、加速度信息, 但对机动目标的估计精度不够. 针对此问题, 本文提出采用改进的 IMM 无迹卡尔曼滤波器在线估计目标运动速度和加速度信息(算法在上位机 GPU 中运行, 保证实时性), 作为前馈补偿回路的输入信号, IMM 卡尔曼滤波即交互多模型卡尔曼滤波器对机动目标速度、加

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-12-05.

责任编辑: 张维海.

†通讯作者. E-mail: lindi@opt.ac.cn.

速度估计实时准确,较常规卡尔曼滤波估计精度高,能够有效提高伺服系统跟踪精度。

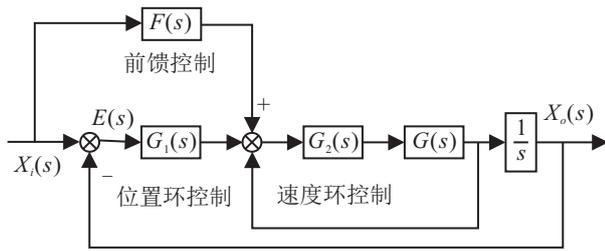


图1 复合控制系统原理

1 伺服系统基本构成及工作原理

如图2所示,空中目标运动被地面搜索跟踪系统的相机捕捉到以后,经过相应的图像处理和信号处理,转化为目标方位运动角信息和俯仰运动角信息(若开启测距功能,则还有距离信息),作为卡尔曼滤波器的输入信号。卡尔曼滤波器具有滤波、运动估计和轨迹预测的功能。

1) 滤波。因为图像处理和转台运动时会产生轻微抖动,使得被观测脱靶量信号存在噪声,这样的信号不经过处理直接送给伺服会引入控制误差,所以采用卡尔曼滤波降噪,将高频噪声滤除后再送给伺服控制系统,提高控制精度。

2) 运动估计。卡尔曼滤波的输入观测量是目标运动的方位、俯仰角,经过卡尔曼滤波后,可以实时估计出目标运动的方位角速度、方位角加速度、俯仰角速度、俯仰角加速度信息。由于是实时在线估计,可以将估计量作为伺服前馈补偿输入,进行前馈补偿,减小因目标运动速度、加速度引起的跟踪误差。图2中的阴影方框即为方位、俯仰前馈补偿控制器。

3) 轨迹预测。如果将脱靶量直接送给伺服控制

系统,则由于图像处理及信号传输延迟及机械响应的延迟,跟踪是滞后的,需要采用卡尔曼滤波器进行轨迹预测,补偿掉由以上因素产生的跟踪滞后。

综上,在低空目标快速飞行情况下,采用卡尔曼滤波器进行运动补偿很有必要,在搜索装置中,方位俯仰通道采用了卡尔曼滤波器,跟踪精度明显提高。而IMM无迹卡尔曼滤波算法受目标机动影响较小,在目标机动情况下估计精度较常规卡尔曼滤波更高。

选择一定数量的IMM滤波器,包括描述目标平稳连续运动状态的模型和描述目标机动的模型,匀速模型为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \dot{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T/2 \\ 1 \end{bmatrix} w(k). \quad (1)$$

加速度CA模型^[14]为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \dot{x}(k+1) \\ \ddot{x}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ \ddot{x}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T/2 \\ 1 \end{bmatrix} w(k). \quad (2)$$

其中: x, \dot{x}, \ddot{x} 分别表示运动目标的角位置、角速度和角加速度分量, $w(t)$ 表示均值为0方差为 σ^2 的高斯白噪声。目标运动模型可以进一步改进为加速度非零均值时间相关模型。

常规卡尔曼滤波离散系统的差分方程和观测方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + \Gamma(k+1, k)w(k), \\ z(k) = H(k)x(k) + v(k). \end{cases} \quad (3)$$

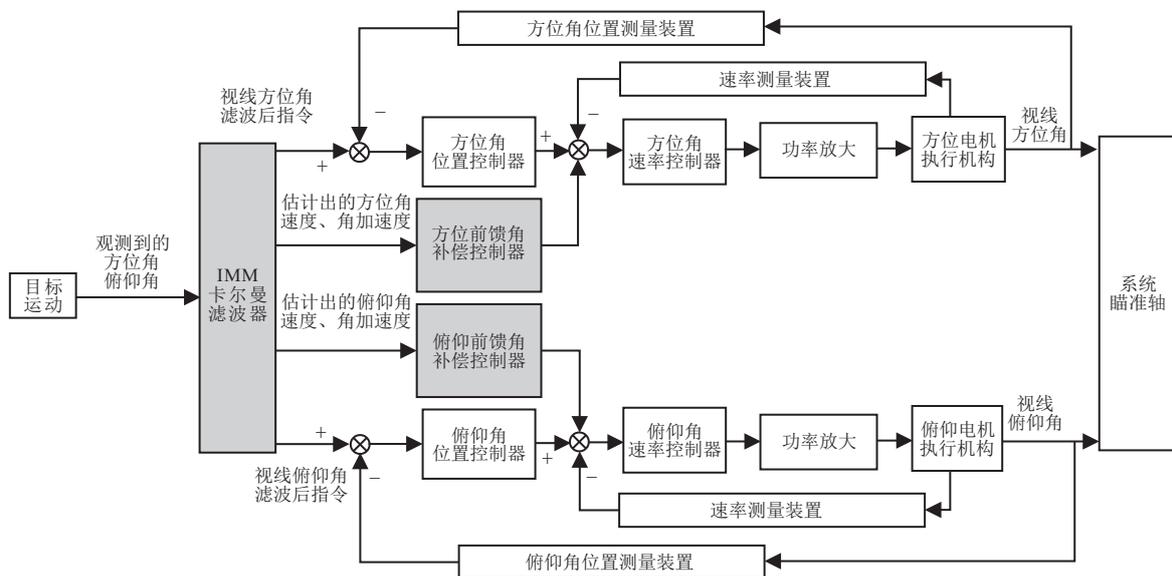


图2 IMM卡尔曼滤波伺服前馈控制原理

其中: Φ 为状态矩阵, H 为观测矩阵. 若用观测方位、俯仰角估计角速度及角加速度信息, 则滤波模型为线性模型; 若用搜索装置观测到的目标方位、俯仰角信息及距离信息估计全状态目标航迹(包括坐标及角度估计), 则观测方程为非线性方程, 此时采用无迹卡尔曼滤波进行滤波估计, 非线性方程如下所示:

$$\begin{cases} X(k+1) = f(x(k), W(k)), \\ Z(k) = h(x(k), V(k)). \end{cases} \quad (4)$$

其中: f 为非线性状态方程函数, h 为非线性观测方程函数.

目标匀速模型和基本卡尔曼滤波构成常规滤波估计模型, 目标加速度、变加速模型和无迹卡尔曼滤波构成其他机动目标滤波模型, 共有 i 个卡尔曼滤波模型, 各模型之间的转移由马尔可夫概率转移矩阵确定, 其中 p_{ij} 表示目标由第 i 个运动模型转移到第 j 个运动模型的概率^[15], 有

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & L & p_{1r} \\ L & L & L \\ p_{r1} & L & p_{rr} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

采用似然函数更新模型概率 $\lambda_j(k)$, 模型 j 的似然函数为

$$\gamma_j(k) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \|M_j(k)\|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} v_j^T M_j^{-1}(k) v_j \right\}. \quad (6)$$

其中

$$v_j(k) = Z(k) - H(k) \hat{X}_j(k/k-1), \quad (7)$$

$$M_j(k) = H(k) P_j(k/k-1) H(k)^T + R(k). \quad (8)$$

模型 j 的概率为

$$\lambda_j(k) = \gamma_j(k) \bar{c}_j / c, \quad (9)$$

其中 $c = \sum_{j=1}^r \gamma_j(k) \bar{c}_j$. 则 i 个卡尔曼滤波的总的状态估计为

$$\hat{X}_j(k/k) = \sum_{j=1}^r \hat{X}_j(k/k) \lambda_j(k). \quad (10)$$

总的协方差估计为

$$P(k/k) = \sum_{j=1}^r \gamma_j(k) \{ P_j(k/k) + [\hat{X}(k/k) - \hat{X}_j(k/k)] [\hat{X}_j(k/k) - \hat{X}(k/k)]^T \}. \quad (11)$$

采用 Matlab 建立目标 S 机动模型, 并分别采用常规卡尔曼滤波(非机动模型)和 IMM 卡尔曼滤波对目标速度和加速度进行估计. 仿真输入数据模拟目标机动由弱变强, 并加入随机噪声, 采用蒙特卡洛方法

仿真 50 次, 得到两种滤波估计误差的均值曲线. 仿真结果如图 3 和图 4 所示. 由图 3 和图 4 可见, 目标机动性越强, 两种算法的估计误差(尤其是加速度估计误差)对比越明显.

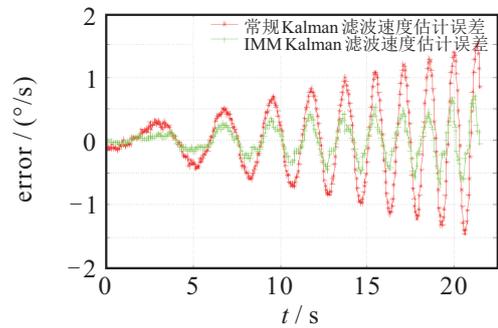


图 3 角速度估计

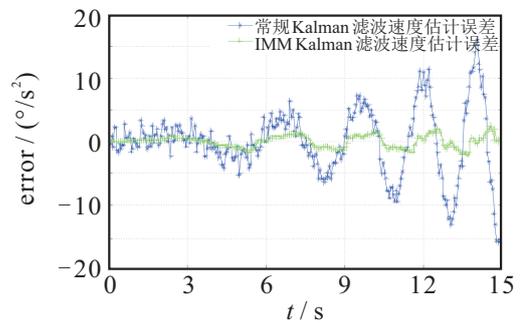


图 4 角加速度估计偏差(抽取估计结果若干点)

采用 IMM 卡尔曼滤波器估计机动目标运动角速度 $\dot{X}(k)$ 与角加速度 $\ddot{X}(k)$, 比直接微分方式和常规卡尔曼滤波估计精度更高, 因此更合适作为前馈控制补偿量. IMM 滤波器组中的卡尔曼滤波单元由于采用了无迹卡尔曼滤波, 对机动目标的非线性有一定的适应能力.

2 IMM 卡尔曼滤波复合控制器

对于图 1 系统, 传递函数^[16]为

$$\frac{X_s(s)}{X_i(s)} = \frac{[1 + F(s)]G(s)}{1 + G(s)}. \quad (12)$$

如果选 $F(s) = \frac{1}{G(s)}$, 则有

$$\frac{X_o(s)}{X_i(s)} = 1. \quad (13)$$

这使输出与输入完全一致, 实现了完全不变性. 事实上, $G(s)$ 总是真有理式, 使得 $F(s)$ 不是真有理式, 因此无法实现完全不变性. 例如

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s + L + b_{n-1}s^{n-1}}{a_1s + a_2s^2 + L + a_ns^n}, \quad (14)$$

将其倒数展开成 s 的级数

$$\frac{1}{G(s)} = f_1s + f_2s^2 + L + f_ns^n. \quad (15)$$

在实际工程中, 一般比较容易获得输入量的一阶导数和近似的二阶导数. 采用直接微分方式获取一

阶、二阶导数会产生较大的噪声,如图5所示.采用IMM卡尔曼滤波估计代替传统微分方式获取目标运动信息作为前馈补偿输入量,可以得到更好的跟踪控制效果和跟踪精度.

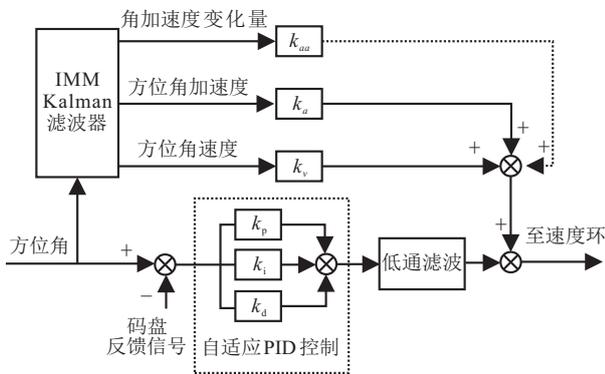


图5 单通道前馈补偿及位置环详细框图

下面分析前馈控制对系统性能所产生的影响.系统的误差传递函数^[17-18]为

$$\frac{E(s)}{X_i s} = \frac{1 - G(s)F(s)}{1 + Gs} \quad (16)$$

当选择 $F(s) = c_1 s + c_2 s^2 + c_3 s^3$ 时,可得

$$\begin{aligned} \frac{E(s)}{X_i s} &= \frac{(a_1 - b_0 c_1)s + (a_2 - b_1 c_1 - c_2)s^2 + L +}{b_0 + (a_1 + b_1)s + (a_2 + b_2)s^2 + L +} \rightarrow \\ &\leftarrow \frac{(a_n - b_{n-1} c_1 - b_{n-2} c_2)s^n - b_{n-1} c_2 s^{n+1}}{(a_{n-1} + b_{n-1})s^{n-1} + a_n s^n} \end{aligned} \quad (17)$$

当选择 $F(s) = c_1 s + c_2 s^2$ 时,可得

$$\begin{aligned} \frac{E(s)}{X_i s} &= \frac{(a_1 - b_0 c_1)s + (a_2 - b_1 c_1 - c_2)s^2 + L +}{b_0 + (a_1 + b_1)s + (a_2 + b_2)s^2 + L +} \rightarrow \\ &\leftarrow \frac{(b_{n-2} c_3 - b_{n-1} c_2)s^{n+1} - b_{n-1} c_3 s^{n+2}}{(a_{n-1} + b_{n-1})s^{n-1} + a_n s^n} \end{aligned} \quad (18)$$

适当配置 $c_1 = \frac{a_1}{b_0}, c_2 = a_2 - \frac{a_1 b_1}{b_0}$ 可以做到输出对速度、加速度输入的无静差跟踪.适当配置 $c_1、c_2、c_3$ 可以实现对加速度变化量的无静差跟踪.以 $c_1、c_2$ 为例,令 $c_1 = k_v, c_2 = k_a$, IMM 卡尔曼滤波首先估计出单通道角速度 $\dot{X}(k)$ 和角加速度 $\ddot{X}(k)$,在调整好参数 $k_a、k_v$ 值后,即可获得较好的跟踪效果,提高跟踪精度.

3 实验验证

在实验室环境下,采用跟踪测试设备模拟产生重复可控的空中目标运动轨迹.测试台示意图如图6所示,搜索装置实物图如图7所示.以平行光管模拟无穷远目标,平行光管安装在悬臂上,电机带动悬臂旋转,在旋转中心轴线与平行光管光轴交点处,架设搜

索跟踪系统,使搜索跟踪系统的相机光心与交点重合,控制搜索跟踪系统对无穷远模拟目标进行跟踪,统计脱靶量,换算成角度后,即为系统跟踪精度.测试台模拟目标运动可产生重复的目标水平匀速、正弦运动,垂直匀速、正弦运动以及综合圆周运动等轨迹.



图6 测试台示意图



图7 搜索装置实物图

控制平行光管沿水平或垂直方向进行S型往复运动,角度行程设置为 20° ,匀速段运动角速度设置为 $3.50^\circ/\text{s}$,其产生的角速率变化和真实目标在 500 m 处以 30 m/s (民用无人机典型最大速度)切向速度运行,所产生的角速率效果相当,操纵搜索跟踪装置对目标进行跟踪,并记录脱靶量信息.先将 K_a 置零,在理论值附近微调 K_v 值. K_v 调整到位后,在理论值附近微调 K_a 值,并固定相应参数.

俯仰通道采用和方位通道类似的调试方法,首先确定理论上的 $K_v、K_a$ 值,然后按照先 K_v 后 K_a 的顺序进行微调,调整完成后固定参数.在相同模拟目标运动及相同参数的情况下测试 IMM 滤波与常规卡尔曼滤波前馈补偿精度,结果如图8~图11所示.

将图9与图8对比、图11与图10对比可见,系统加入 IMM 卡尔曼滤波速度、加速度估计前馈补偿后,有效消除了由于目标机动产生的跟踪误差,脱靶量减小,跟踪精度显著提高.由于常规卡尔曼滤波在目标机动段估计精度降低,补偿精度和跟踪精度都较低.

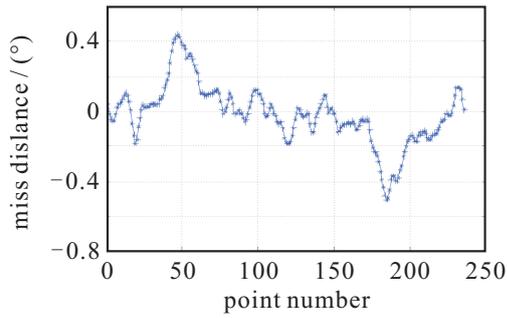


图8 方位常规卡尔曼滤波前馈补偿情况下脱靶量

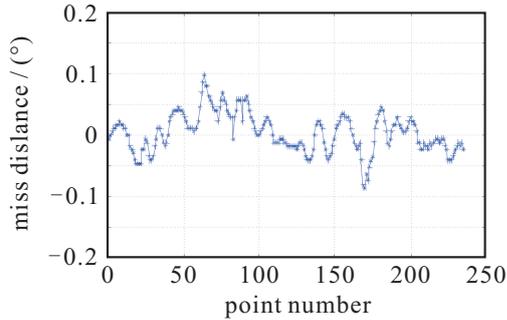


图9 方位IMM卡尔曼滤波前馈补偿后脱靶量

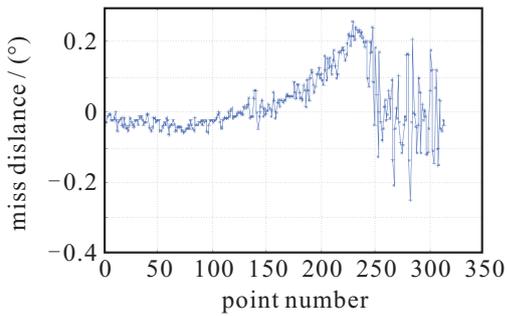


图10 俯仰常规卡尔曼滤波前馈补偿脱靶量

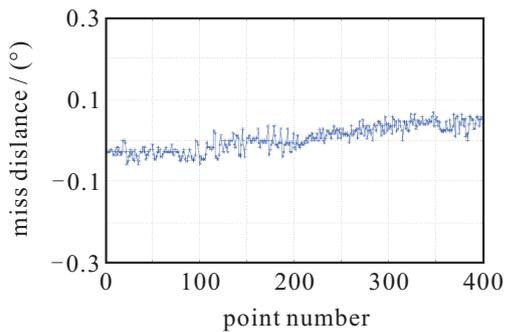


图11 俯仰IMM卡尔曼滤波前馈补偿脱靶量

通过调试发现,在测试台平行光管以目标机动典型S型轨迹运动的情况下(产生的模拟目标运动是重复可控的),搜索装置方位常规卡尔曼滤波补偿的最大脱靶量为 0.17° (RMS),加上IMM卡尔曼滤波前馈补偿的最大脱靶量为 0.035° (RMS),跟踪精度提高了4~5倍;俯仰常规卡尔曼滤波补偿的最大脱靶量为 0.1° (RMS),加上IMM卡尔曼滤波前馈补偿的最大脱靶量为 0.03° (RMS),跟踪精度提高了3倍。根据捕获的实际各型无人机机动飞行轨迹特征,在仿真

转台上进行模拟测试,均获得了较好的前馈补偿效果。因此,在目标机动情况下,IMM卡尔曼滤波较传统卡尔曼滤波对速度、加速度估计精度更高,对目标机动引起的跟踪误差有更好的补偿效果,IMM卡尔曼滤波前馈补偿实验验证有效。

4 结 论

本文提出采用IMM卡尔曼滤波技术估计目标运动速度和加速度信息,并作为伺服前馈补偿的输入量,以消除由于目标速度和加速度运动引起的脱靶量误差。实际系统测试实验表明,搜索跟踪系统采用IMM卡尔曼滤波前馈补偿技术使得系统跟踪精度较常规卡尔曼滤波补偿提高3倍以上,模型验证有效。

参考文献(References)

- [1] 奚玉鼎,于涌.一种快速搜索空中低慢小目标的光电系统[J].光电工程,2018,45(4):53-61.
(Xi Y D, Yu Y. An optoelectronic system for fast search of low-slow-small target in the air[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(4): 53-61.)
- [2] 任清安,吕春燕.雷达光电智能协同探测技术研究[J].雷达科学与技术,2016,14(2):173-177.
(Ren Q A, Lv C Y. Research on radar and photoelectric collaborative tracking algorithm[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(2): 173-177.)
- [3] 李菠,孟立凡,李晶,等.低空慢速小目标探测与定位技术研究[J].中国测试,2016,42(12):64-69.
(Li B, Meng L F, Li J, et al. Research on detecting and locating technology of LSS-UAV[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(12): 64-69.)
- [4] 张宏伟,许道明.Radon变换的雷达低慢小目标检测方法[J].现代防御技术,2018,46(3):105-111.
(Zhang H W, Xu D M. Radar detection method for low-altitude slow and small target based on radon transform[J]. Modern Defence Technology, 2018, 46(3): 105-111.)
- [5] 李明明,卞伟伟,甄亚欣.国外“低慢小”航空器防控装备发展现状分析[J].飞航导弹,2017,1:62-70.
(Li M M, Bian W W, Zhen Y X. Analysis on the development of low-altitude slow small aircraft control equipment[J]. Marling Missile, 2017, 1: 62-70.)
- [6] 邓家磊.融合图像空间信息的城市低空目标跟踪方法研究[D].南京:南京理工大学自动化学院,2013.
(Deng J L. Research on image dimensional information fusion of low flying targets tracking in the city[D]. Nanjing: Automation College, Nanjing University of Science and Technology, 2013.)
- [7] Collins R T. MeanShift blob tracking through scale space[C]. Proceedings of IEEE International Conference

- on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). Madison: IEEE, 2003: 234-240.
- [8] Dorin Comaniciu, Visvanathan Ramesh, Peter Meer. Kernel-based object tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564-577.
- [9] 袁国武. 智能视频监控中的运动目标检测和跟踪算法研究[D]. 昆明: 云南大学信息学院, 2012.
(Yuan G W. Research on moving objects detection and tracking methods in intelligent visual surveillance system[D]. Kunming: School of Information, Yunnan University, 2012.)
- [10] 郭睿利. 地面机动目标跟踪算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学自动化学院, 2011.
(Guo R L. Research on ground maneuvering target tracking algorithm[D]. Hangzhou: Automation College, Hangzhou Dianzi University, 2011.)
- [11] 解晓萌. 复杂背景下运动目标检测和识别关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学计算机科学与工程学院, 2012.
(Xie X M. Research on key techniques of moving object detection and recognition in complex background[D]. Guangzhou: College of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, 2012.)
- [12] 王瑾琦. 复杂背景下运动目标检测与跟踪方法研究[D]. 太原: 中北大学仪器与电子学院, 2012.
(Wang J Q. Research on motion object detection and tracking methods based on complex background[D]. Taiyuan: College of Instruments and Electronics, North University of China, 2012.)
- [13] 吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 204-208.
(Wu H P. Infrared search system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013: 204-208.)
- [14] 周瑞青, 刘新华. 捷联导引头稳定与跟踪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 76-78.
(Zhou R Q, Liu X H. Strapdown seeker stability and tracking technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 76-78.)
- [15] 黄小平, 王岩. 卡尔曼滤波原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 119-122.
(Huang X P, Wang Y. The principle and application of Kalman filtering[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 119-122.)
- [16] 吕俊伟, 何友金, 韩艳丽. 光电跟踪测量原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 95-101.
(Lv J W, He Y J, Han Y L. Photoelectric tracking measurement principle[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 95-101.)
- [17] Oliveira V A, Cossi L V, Teixeira M C M, et al. Synthesis of PID controllers for a class of time delay systems[J]. Automatica, 2009, 45(7): 1778-1782.
- [18] 黄海波, 左韬, 陈晶, 等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1561-1565.
(Huang H B, Zuo T, Chen J, et al. Optimum design of servo bandwidth for fine track subsystem in compound-axis system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1561-1565.)

作者简介

林梯(1984—), 男, 工程师, 博士, 从事光电跟踪及精密测量等研究, E-mail: lindi@opt.ac.cn;

吴易明(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事光电精密测量等研究, E-mail: wym34@opt.ac.cn;

朱帆(1985—), 男, 工程师, 博士, 从事光电精密测量等研究, E-mail: 1164018467@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)