光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024011504

一种提升单探测器复合跟踪中粗跟瞄子系统预测精度和稳定性的方法

陈加文[1,2]，孙 凝[1,2]，刘建国[1,2*]

（1. 中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室，北京 100083；2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院，北京 100049）

摘 要： 针对单探测器复合轴粗跟瞄预测过程中数据利用率不高的问题，提出了基于卡尔曼滤波和最小二乘法的实时预测方法，并通过实测振动数据进行仿真验证。结果显示：随着步长的增加，数据点之间的关联性降低，导致预测准确性和稳定性下降；数据利用率的提高又会增加数据点关联性，提升预测准确性和稳定性。在预测步长为 25 ms 即数据利用率为 75％的情况下，达到预测误差最小和稳定性最优的平衡点。

关键词： 自由空间光通信；捕获、跟踪和对准系统；单探测器复合轴系统；预测算法

中图分类号： TN929.1 **文章编号：** 1001－5868(2024)04－0659－04

Method for Improving Prediction Accuracy and Stability in Coarse-Aiming Subsystem of Single-Detector Composite Tracking

CHEN Jiawen[1,2], SUN Ning[1,2], LIU Jianguo[1,2]

（1. Laboratory of Nano-Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN;
2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technol, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN）

Abstract: To address the problem of low data utilization efficiency in the coarse-aiming prediction of a single-detector composite axis, a real-time prediction method based on Kalman filtering and the least-squares method is proposed and validated via simulations using actual vibration data. The results show that as the step size increases, the correlation between data points decreases, thus reducing the prediction accuracy and stability.

However, increasing data utilization enhances the correlation between data points, thereby improving the prediction accuracy and stability. An optimal balance between minimal prediction error and optimal stability is achieved at a prediction step length of 25 ms, which corresponds to a data utilization rate of 75％.

Key words: free-space optical communication; ATP system; single-detector composite axis; prediction algorithm

0 引言

自由空间光通信凭借其高速率、大带宽和低功耗等优势，在多个领域展现出重要的应用价值[1]。作为自由空间光通信的核心子系统，捕获、跟踪和对准(ATP)系统主要功能是对目标进行快速高概率捕获以及持续动态跟踪[4]。目前，该子系统多采用粗跟和精跟两种跟瞄方式的复合轴控制来提高精度和带宽[3]，前者的特点是低速大范围地对目标进行定位，而后者则专注于快速小范围地弥补粗跟瞄残

收稿日期：2024－01－15.
基金项目：国家自然科学基金项目(12374397).
* **通信作者：**刘建国

留的误差，以及补偿高频、小幅度的平台振动[3]。

相较于双探测器型复合轴系统，单探测器型复合轴系统具有结构简单、装配难度低、可靠性好且便于小型化等优势，能灵活地应用于小型移动平台例如无人机或汽车[8]。但其仅依赖单个探测器，探测到的新数据只能被高速刷新的精跟瞄系统及时捕获，而无法被移动缓慢的粗跟瞄系统充分利用，导致后者预测精度和稳定性不佳。近年，多项研究都致力于提高 ATP 的跟瞄预测性能[12]，作为经典最优估计，卡尔曼滤波在此过程中取得了显著成效[12-15]。

本文针对单探测器复合轴中的粗跟瞄预测算法数据利用率不高的问题，基于卡尔曼滤波提出了一种改进的实时预测方法，并通过仿真实验验证了其有效性。结果表明：在合理设定采样、控制和预测步长后，数据利用率最高可达 100%，并且显著提升了系统的跟踪精度和稳定性。

1 卡尔曼滤波概述

卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入观测数据，对系统状态进行最优估计和预测的算法[9]。在空间光通信系统中，激光光斑在 CCD 或者 CMOS 探测器焦平面上的运动可以分解为水平和竖直两个方向上的运动（映射为 x 轴和 y 轴），可以用状态向量 $\boldsymbol{X}_k=[x_k,y_k,x'_k,y'_k,x''_k,y''_k]$ 表示，式中在 k 时刻分别对 x 轴和 y 轴的位置、速度、加速度进行描述。观测向量 $\boldsymbol{Z}_k=[x_{ck},y_{ck}]$，其中 x_{ck}，y_{ck} 分别表示 k 时刻系统探测到光斑在 x 轴和 y 轴的坐标。利用系统过程模型可得从式(1)到式(6)的预测回路。详细递推方程如下：

(1)观测值：

$$\boldsymbol{Z}_k=\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{X}_k+\boldsymbol{V}_k \tag{1}$$

(2)预测值：

$$\boldsymbol{X}_k^-=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X}_{k-1}+\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{U}_{k-1}+\boldsymbol{W}_{k-1} \tag{2}$$

(3)预测协方差更新：

$$\boldsymbol{P}_k^-=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{P}_{k-1}\cdot\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}+Q \tag{3}$$

(4)卡尔曼增益：

$$\boldsymbol{Kg}_k=\frac{\boldsymbol{P}_k^-\cdot\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{P}_k^-\cdot\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}+R} \tag{4}$$

(5)最优估计：

$$\boldsymbol{X}_k=\boldsymbol{X}_k^-+\boldsymbol{Kg}_k\cdot(\boldsymbol{Z}_k-\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{X}_k^-) \tag{5}$$

(6)最优估计协方差更新：

$$\boldsymbol{P}_k=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{Kg}_k\cdot\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}_k^- \tag{6}$$

式中，观测矩阵 $\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0\end{bmatrix}$；观测噪声 $\boldsymbol{V}_k$ 和系统噪声 $\boldsymbol{W}_k$ 分别为均值为零的高斯白噪声，对应的协方差为 R 和 Q；$\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 分别是状态转移矩阵和状态控制矩阵。

2 多步长卡尔曼滤波算法描述

本文提出了一种多步长卡尔曼滤波方法，该方法通过设置不同的预测步长，使用多个卡尔曼滤波器，按照固定间隔依次工作，从而得到同一位置多个不同时间点的预测值，并利用四阶最小二乘法对数据进行平滑处理，在粗跟瞄预测中得到比传统单步长更加准确和稳定的预测值。

在单探测器复合轴系统中，以精粗跟瞄的典型的通信频率（200 Hz 和 50 Hz）为例进行分析：①当预测步长为 20 ms 时，卡尔曼滤波器在 0 时刻开始工作并得到 20 ms 时刻的预测值，当 20 ms 时刻来临时，根据当前的观测值和预测值得到当前的最优估计和 40 ms 时刻的预测值；②当预测步长为 25 ms 时，第一个卡尔曼滤波器在 0 时刻开始工作得到 25 ms 时刻的预测值，后续四个卡尔曼滤波器按照 5 ms 的时间间隔依次开始工作。当 20 ms 时刻来临，此时的卡尔曼滤波器已经得到 45 ms 时刻的预测值，但系统要求输出 40 ms 时刻的预测值，所以可以利用数据平滑的方式将 35，40，45 ms 的预测值进行平滑处理以得到更优的预测值；③当预测步长为 30 ms 时，同理可以将 30，35，40，45，50 ms 的预测值进行平滑处理。多步长卡尔曼滤波的示意图如图 1 所示，对应的数据利用率如表 1 所示。

表 1 多步长卡尔曼滤波数据利用率

预测步长/ms	数据利用率/%
20	25
25	75
30	100

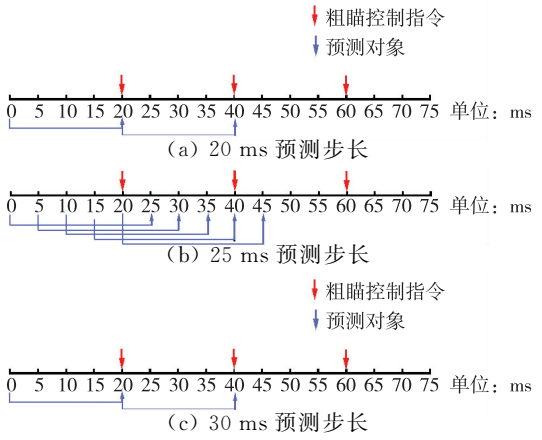


图 1 多步长卡尔曼滤波示意图

3 仿真结果及分析

参照国家标准 GB/T 4970-1996《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》中的规定[10]，利用三向加速度传感器，捕获到典型路面 B 级路面的抖动情况，并在频域内得到的加速度自谱密度函数[11]，结合车载减震器的性能尺寸表，转换到时域后得到转动谱，其中典型的 3 000 个数据分布如下图 2 所示。

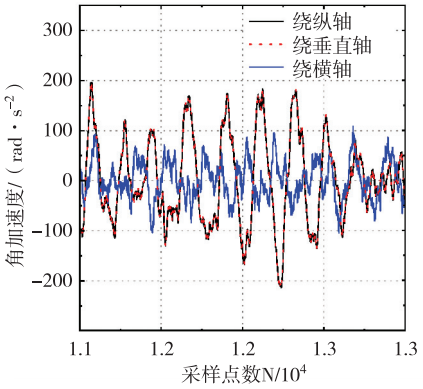


图 2 三向激励下的转动谱

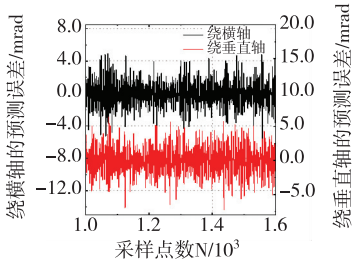
在仿真中选取了绕垂直轴和绕横轴两个方向上的角加速度，并设置其他的仿真参数，如表 2 所示：

表 2 多步长卡尔曼滤波仿真参数设置

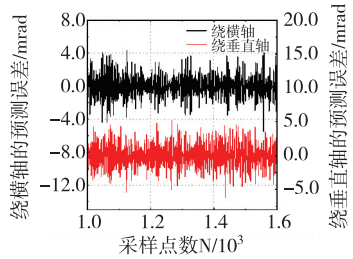
参数名称	数值	备注
初始位置	(0,0)	
距离/m	10	
初速度/(m·s^{-1})	(10,10)	
加速度/(m·s^{-2})	(转动谱×10)	
探测噪声	±0.02	均值为 0 的高斯白噪声
过程噪声 u	0.004	
滤波间隔 dt1	1/50	步长为 20 ms
滤波间隔 dt2	1/40	步长为 25 ms
滤波间隔 dt3	1/33	步长为 30 ms

代入上述仿真参数，得到不同步长的卡尔曼滤波预测误差分布情况，选取其中典型 600 个数据，如图 3 所示。由图可知，随着预测步长的增加，绕横轴(或者绕垂直轴)的误差波形相似，误差幅值却先减小再增大，当步长为 25 ms 时，得到误差幅值最小的波形。为更好描述不同步长的预测性能，计算得到误差绝对值的均值和对应的标准差，如图 4，5 所示。

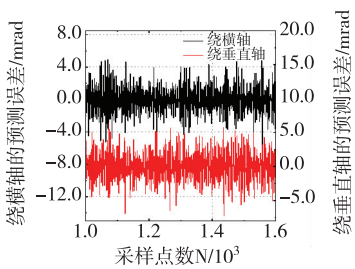
在图 4 和图 5 中，首先对比了数据平滑处理的顺序对预测性能的影响：先预测是指每个卡尔曼滤波相互独立，使用四阶最小二乘法对不同预测值进行数据平滑处理后直接输出，处理后的预测值不参与到下一次计算回路中；而先平滑是指每个卡尔曼滤波器相互影响，先将不同的预测通过平滑处理后，作为当前时刻卡尔曼滤波器的预测值，参与到下一次计算回路中。从结果上看，先平滑的方式不如先预测的效果好，分析其原因可能是最小二乘法数据拟合的过程中引入较大的误差。其次，由于绕垂直轴的加速度明显大于绕横轴，在各个步长下预测误差都偏大。最后，随着步长的增加，卡尔曼滤波的预测性能和稳定性都呈现出先增后减的特点，当步长为 25 ms(数据利用率 75%)时，粗跟瞄预测性能达到最优。



(a) 步长为 20 ms 的预测误差



(b) 步长为 25 ms 的预测误差



(c) 步长为 30 ms 的预测误差

图 3 三种步长下的预测误差

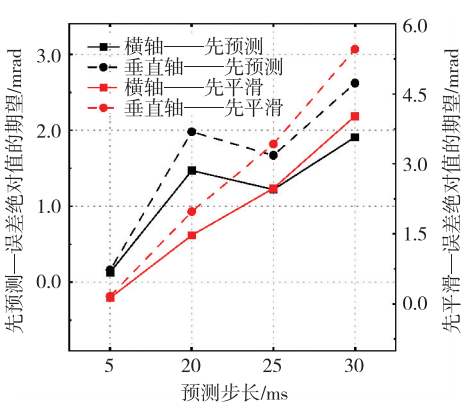


图 4 不同步长下卡尔曼滤波的预测误差均值

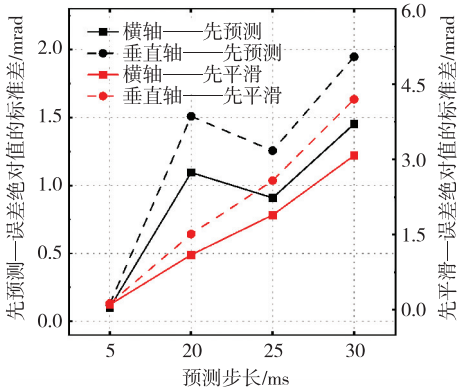


图 5 不同步长下卡尔曼滤波的预测误差标准差

4 结论与展望

基于当前模型和参数设置下的多步长卡尔曼滤波器，使用最小二乘法作为数据平滑算法，将原本 20 ms 单步长预测的误差减少 16.8%和 15.6%，对应的稳定性提升 20%和 16.7%。随着步长的增加，数据点之间的关联性降低，导致预测正确性和稳定性下降，但数据利用率的提高又会增加数据关联性，提升预测准确性和稳定性。在 25 ms 步长下，预测误差和标准差达到了最优的平衡点。

基于当前模型和参数得出的多步长卡尔曼滤波的性能仍有改进空间，后续优化方向包括：①调整 25 ms 步长的三个预测值策略，采用前一时刻最优输出和当前及下一时刻预测值，以进一步减少数据抖动，增强预测稳定性；②根据具体应用场景调整卡尔曼滤波器参数，以实现更佳的预测效果，选择更适合的数据平滑方法，适应特定应用需求；③使用减震转置得到更好的转动谱，进一步提升预测性能。

参考文献：

[1] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective [J]. IEEE Commun. Surv. Tutor., 2014, 16(4): 2231-2258.

[2] Toyoshima M, Leeb W R, Kunimori H. Comparison of microwave and light wave communication systems in space application[J]. Opt. Eng., 2007, 46(1): 015003.

[3] Wang J, Lv J, Zhao G, et al. Free-space laser communication system with rapid acquisition based on astronomical telescopes [J]. Opt. Express, 2015, 23(16): 20655-20657.

[4] Li X, Yu S, Ma J, et al. Analytical expression and optimization of spatial acquisition for intersatellite optical communications[J]. Opt. Express, 2011, 19(3): 2381.

[5] Gawronski W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes [J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2007, 15(2): 276-289.

[6] 赵 磊，纪 明，赵振海，等. 舰载激光武器稳定平台粗精复合控制[J]. 激光与红外，2019，49(1)：86-91.
Zhao Lei, Ji Ming, Zhao Zhenhai, et al. Primary-precise compounded control for stabilized platform in shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(1): 86-91.

[7] 倪迎雪，伞晓刚，高世杰，等. 激光通信 APT 系统中快速反射镜研究[J]. 激光与红外，2018，48(2)：140-146.
Ni Yingxue, San Xiaogang, Gao Shijie, et al. Research of steering mirror in laser communication APT system[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2): 140-146.

[8] Sun N, Wang Y, Zhu H, et al. Self-alignment FSOC system with miniaturized structure for small mobile platform [J]. IEEE Photonics J., 2022, 14(6): 1-6.

[9] Li Q, Li R, Ji K, et al. Kalman filter and its application[C]// 2015 8th Inter. Conf. on Intelligent Networks and Intelligent Systems(ICINIS), 2015: 74-77.

[10] GB/T4970-1996，汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S].
GB/T4970-1996, Automotive ride comfort random input driving test method[S].

[11] 穆立茂，黄海英，张 靖. 货车货厢振动环境测试与数据处理[J]. 装备环境工程，2007，4(4)：27-30.
Mu Limao, Huang Haiying, Zhang Jing. Truck cargo compartment vibration environment testing and data processing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(4): 27-30.

[12] Wu R, Zhao X, Tian C. Improving line-of-sight pointing accuracy of laser communication system based on Kalman filter[J]. Opt. Eng., 2019, 58(1): 016110.

[13] Wang J, Lv J, Zhao G, et al. Free-space laser communication system with rapid acquisition based on astronomical telescopes[J]. Opt. Express, 2015, 23(16): 20655-20667.

[14] Solanki P B, Al-Rubaiai M, Tan X. Extended Kalman filter-based active alignment control for LED optical communication [J]. IEEE/ASME Trans. Mechatron., 2018, 23(4): 1501-1511.

[15] Ye T, Zhou F. Autonomous space target recognition and tracking approach using star sensors based on a Kalman filter [J]. Appl. Opt., 2015, 54(11): 3455-3469.

作者简介：

陈加文(1998—)，男，四川省人，硕士研究生，主要研究方向为空间光通信跟踪算法；

刘建国(1975—)，男，内蒙古自治区人，博士，研究员，教授，主要研究方向为应用光学。