

基于自适应卡尔曼算法的单探测器解耦控制技术研究

董全睿, 王伟国, 陈 飞, 陈 涛, 张振东, 刘廷霞

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高激光通信跟瞄系统的跟踪性能, 增强系统的抗扰动能力, 提出基于卡尔曼滤波的单探测器复合轴控制方法。首先, 对单探测器复合轴系统原理进行分析, 通过误差传递函数验证了解耦算法的可行性; 其次, 为了改善脱靶量迟滞的影响, 同时降低探测器实时处理的要求, 提出一种自适应卡尔曼滤波算法; 最后, 根据探测器坐标系与快速反射镜坐标系之间的旋转变换关系, 计算出粗精系统的解耦矩阵, 并搭建一套桌面实验系统进行原理验证。实验结果表明: 单探测器复合轴在 0.1 Hz 低频扰动条件下, 精跟踪系统的相对位移不会超出反射镜偏转角度的临界值, 跟踪误差由 2.54 μrad 下降到 0.86 μrad 。解耦控制能够提高系统跟踪精度并增强抗扰动能力。对于以后工程中的实际应用具有一定的指导意义。

关键词: 激光通信跟瞄系统; 单探测器; 卡尔曼滤波; 解耦矩阵

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210375

Research on single-detector decoupling control technology based on adaptive Kalman algorithm

Dong Quanrui, Wang Weiguo, Chen Fei, Chen Tao, Zhang Zhendong, Liu Tingxia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the tracking performance of the laser communication tracking system and enhance the anti-disturbance capability of the system, a single-detector composite axis control method based on Kalman filter was proposed. Firstly, the principle of the single detector composite axis system was analyzed, and the feasibility of the decoupling algorithm was verified by the error transfer function. Then in order to improve the impact of miss distance and reduce the real-time processing requirements of the detector, an adaptive Kalman filter algorithm was proposed. Finally, according to the rotation transformation relationship between the detector coordinate system and the fast steering mirror coordinate system, the decoupling matrix of the coarse and fine system was calculated, and a desktop experimental system was built to verify the principle. With the condition of 0.1 Hz low frequency disturbance, the relative displacement of the fine tracking system will not exceed the critical value of the mirror deflection angle, and the tracking error will decrease from 2.54 μrad to 0.86 μrad . The experimental results show that the decoupling control can improve the tracking accuracy and enhance the anti disturbance ability of the system. It has a certain guiding significance for the practical application in the future engineering.

Key words: laser communication tracking and pointing system; single-detector; Kalman filter; decoupling matrix

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-02-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018 YFE0203202); 国家自然科学基金 (61975203)

作者简介: 董全睿, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电精密跟踪测量技术方面的研究。

0 引言

在空间激光通信过程中,捕获、跟踪和瞄准(Acquisition Tracking Pointing, ATP)系统是用来建立和维持通信链路的关键技术。典型的 ATP 系统一般采用复合轴控制,包括粗跟踪系统和精跟踪系统两部分^[1]。粗跟踪系统主要由电机驱动二维转台实现对目标的捕获跟踪,而精跟踪系统能够进一步抑制粗跟踪系统的残差,通过对快速反射镜的控制完成小偏转角的精密跟踪与瞄准。复合轴跟踪系统根据粗跟踪系统和精跟踪系统是否共用同一个探测器可分为单探测器系统和双探测器系统^[2]。双探测器系统控制器设计相互独立,容易实现较高的跟踪精度,但是存在体积重量较大的缺点,不利于轻小型化设计;单探测器系统减少了一路光学系统,可有效实现系统轻小型化,但是存在耦合现象导致控制难度大,跟踪精度难以保证^[3]。美国的 OCD 终端是最早应用单探测器复合轴技术的工程实例,该系统采用相机开窗技术,减化了终端的光路设计^[4]。德国的“猎鹰”终端也采用单探测器复合轴结构,实现了高精度的跟踪指标^[5]。近年来,国内已有一些研究机构开展了相关研究,参考文献 [6] 对单探测器复合轴跟踪系统相关理论进行了深入的推导,有效证明了解耦算法原理和误差理论;参考文献 [7] 搭建了一套实验验证系统,对单探测器复合轴解耦系统进行测试,为工程化做好铺垫;参考文献 [8] 将复合轴跟踪技术应用在天基光电跟踪系统中,实现了对光轴的稳定控制。

在光电跟踪系统工作过程中,可能会出现云层遮挡导致目标丢失无法获取脱靶量的现象;同时也为了解决相机脱靶量延迟现象,降低探测器实时处理的要求,文中采用自适应卡尔曼滤波的方法对脱靶量进行处理。卡尔曼滤波算法可根据前一时刻的状态和当前测量信息,通过递推方式可计算新的估计值^[9-11]。经过研究人员几十年的深入研究,在许多领域都已成功实现应用^[12-14]。文中提出一种自适应卡尔曼滤波的方法,对测量噪声方差矩阵实时估计,可有效抑制探测器噪声对卡尔曼滤波的影响。

文中为检验单探测器复合轴的实际性能,模拟实际应用搭建了一套桌面实验平台,实验系统选择用一个大行程的快速反射镜(FSM)模拟粗跟踪转台实现

粗跟踪功能,使用小行程高分辨率的快速反射镜实现精跟踪过程。结合单探测器型复合轴的关键技术,对系统的跟踪性能指标进行测试。旨在保证跟踪精度的前提下,利用小视场相机的复合轴实验系统,实现提高系统的抗扰动能力,抑制更大幅度扰动的目的。

1 单探测器复合轴系统原理分析

复合轴跟踪系统在不同的应用场景由不同的结构组成,文中以激光通信光电跟踪系统为例,单探测器复合轴的基本结构框图如图 1 所示。单探测器复合轴跟踪系统主要包括主轴粗跟踪系统和子轴精跟踪系统,并且两轴共用一个探测器完成 ATP 的工作过程。

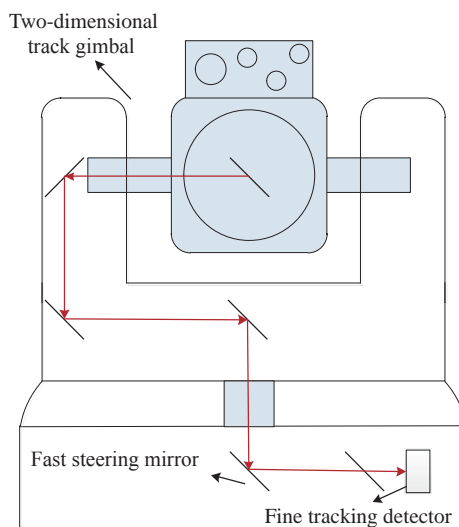


图 1 单探测器复合轴的基本结构原理图

Fig.1 Basic structure schematic diagram of compound axis of single detector

为了分析控制系统传递函数,单探测器复合轴控制结构图如图 2 所示。其中, $G_d(s)$ 为系统探测器的传递函数, $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ 分别为粗、精跟踪系统控制器的传递函数, $D(s)$ 为解耦控制器, $G_{p1}(s)$, $G_{p2}(s)$ 分别为

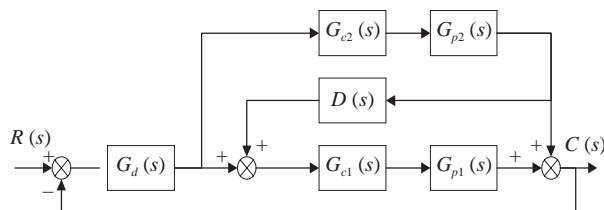


图 2 单探测器复合轴控制结构图

Fig.2 Control structure diagram of single detector compound axis

粗、精跟踪系统被控对象的传递函数, $R(s)$ 为系统的输入引导函数, $C(s)$ 为系统的输出函数。

$$G(s) = \frac{G_d G_{c1} G_{p1} + G_d G_{c2} G_{p2} + G_d D G_{c2} G_{p2} G_{c1} G_{p1}}{(1 + G_d G_{c1} G_{p1})(1 + G_d G_{c2} G_{p2}) + G_d G_{c2} G_{p2} G_{c1} G_{p1} (D - G_d)} \quad (1)$$

由公式 (1) 可知, 解耦控制器 $D(s)$ 与探测器的传递函数 $G_d(s)$ 相等时, 系统的耦合特性被消除, 成为静态自主系统, 系统特征方程等于粗、精跟踪系统的特征方程乘积。因此, 单探测器复合轴跟踪系统稳定的必要条件是粗、精跟踪系统均为稳定系统。

$$\phi_e(s) = \frac{1}{(1 + G_d G_{c1} G_{p1})(1 + G_d G_{c2} G_{p2}) + G_d G_{c2} G_{p2} G_{c1} G_{p1} (D - G_d)} \quad (3)$$

从误差传递函数表达式 (3) 可以看出, 当 $D(s) = G_d(s)$ 时, 系统完全解耦, 单探测器复合轴跟踪系统误差传递函数可以等效为粗、精跟踪系统各自误差传递函数的乘积, 而传统复合轴系统的误差传递函数只取决于精跟踪系统的误差传递函数, 因此, 采用单探测器复合轴控制可以提高系统的跟踪精度。

2 自适应卡尔曼滤波

单探测器复合轴跟踪系统所用探测器通常为 CCD 相机, 由于探测器存在脱靶量滞后的现象, 提升了解算解耦控制器使其逼近 CCD 探测器传递函数的难度, 同时为了降低探测器实时处理的要求, 满足粗、精跟踪系统带宽匹配的需要, 文中采用卡尔曼滤波技术解决脱靶量滞后的问题; 另一方面, 卡尔曼滤波技术对预测脱靶量有较好的估计作用, 可在短时间目标丢失无脱靶量的情况下为跟踪系统提供数字引导。基于卡尔曼滤波的单探测器控制结构如图 3 所示。

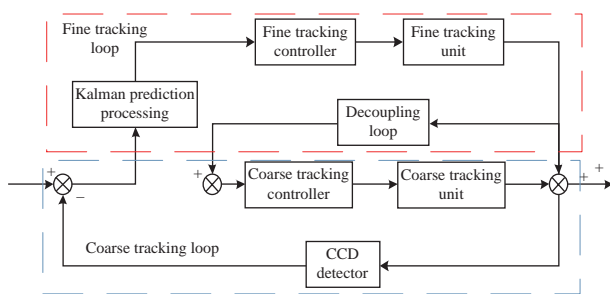


图 3 基于 Kalman 滤波的复合轴控制结构图

Fig.3 Compound axis control structure diagram based on Kalman filter

假设线性离散系统的过程模型以及测量模型可表示为:

根据梅森公式, 可得单探测器复合轴跟踪系统的传递函数为:

设复合轴跟踪系统的误差函数为 $E(s)$, 则误差函数可表述为:

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (2)$$

则根据公式 (2) 可推导出系统误差传递函数 $\phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)}$ 的表达式:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k)x(k) + w(k) \\ z(k) = C(k)x(k) + v(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x(k)$ 为待估计状态变量; $z(k)$ 为实际测量值; $w(k)$ 为过程噪声; $v(k)$ 为测量噪声; 并假设以下条件成立:

$$\begin{cases} w(k) \sim (0, Q(k)) \\ v(k) \sim (0, R(k)) \\ E[w(k)w^T(j)] = Q(k)\delta(k-j) \\ E[v(k)v^T(j)] = R(k)\delta(k-j) \\ E[w(k)v^T(j)] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: 矩阵 $Q(k)$ 和 $R(k)$ 分别表示过程噪声协方差矩阵和测量噪声协方差矩阵; $\delta(k-j)$ 为 Kronecker- δ 函数, 如果 $k \neq j$, 那么 $\delta(k-j)=0$; 如果 $k = j$, 那么 $\delta(k-j)=1$ 。

则离散卡尔曼滤波迭代预测的过程可表示为^[15-17]:

(1) 对状态变量进行预测

$$\hat{x}(k+1|k) = A(k)\hat{x}(k|k) \quad (6)$$

$$P(k+1|k) = A(k)P(k|k)A^T(k) + Q(k) \quad (7)$$

式中: $\hat{x}(k+1|k)$ 为先验估计状态值, 利用 k 时刻及以前时刻测量值的最优估计预测 $(k+1)$ 时刻的测量值, $\hat{x}(k|k)$ 为后验状态估计值; $P(k+1|k)$ 为协方差预测矩阵。

(2) 计算滤波增益矩阵

$$K(k+1) = P(k+1|k)C^T(k)[C(k)P(k+1|k)C^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (8)$$

(3) 状态更新方程

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)[z(k+1) - C(k)\hat{x}(k+1|k)] \quad (9)$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)C(k+1)]P(k+1|k) \quad (10)$$

由于传统的卡尔曼滤波算法将测量噪声方差矩阵认定为固定不变的,即 $R(k)=K, K \in R$ 。但在实际工作过程中,由于探测器噪声以及运动平台抖动等原因,测量噪声方差矩阵是时变的。因此,文中采用自适应卡尔曼滤波的方法,对测量噪声方差矩阵实时估计,可有效抑制探测器噪声对卡尔曼滤波的影响。将公式(8)中的常数 $R(k)$ 用 $R(k) = (1 + \beta_k)R(k-1)$ 代替,其中 β_k 表示测量噪声方差矩阵迭代系数。

定义噪声残差的方差理论值为:

$$\Gamma(k) = C(k)P(k|k-1)C^T(k) + R(k-1) \quad (11)$$

定义噪声残差的方差实际值为:

$$D(k) = [z(k) - C(k)\hat{x}(k|k-1)][z(k) - C(k)\hat{x}(k|k-1)]^T \quad (12)$$

则 β_k 可用下式表示:

$$\beta_k = K_p [\text{trace}(\Gamma(k)) - \text{trace}(D(k))] \quad (13)$$

式中: $\text{trace}(\cdot)$ 表示矩阵的迹; K_p 为比例系数。通过公式(11)和公式(13)可以看出,噪声残差的方差理论值 $\Gamma(k)$ 是与测量噪声方差矩阵 $R(k)$ 是单调递增的关系,根据噪声残差的方差理论值与噪声残差的方差实际值的误差,不断地调整迭代系数 β_k 的大小使得误差逐渐缩小。从公式(13)进一步可以看出,假设 $\Gamma(k) = D(k)$,此时 $\beta_k = 0$,即 $R(k) = R(k-1)$,测量噪声方差矩阵是固定的常数,因此,传统的卡尔曼滤波算法可看作是一种理想的假设情况,可以看作是自适应卡尔曼滤波算法的特殊情况。在实际工程中,为了尽可能提高卡尔曼滤波算法的可靠性,需要对传统的算法进行改进。

3 粗精指向对准解耦矩阵建立方法

通过上文的分析可知,解耦矩阵的准确性直接影响复合轴系统的稳定性以及跟踪精度。单探测器复合轴跟踪系统的探测器只给精跟踪回路提供脱靶量信息,粗跟踪回路的误差信息只能通过精跟踪回路快速反射镜的偏转角度进行补偿,为了得到粗、精跟踪系统的解耦矩阵需要得到快速反射镜的偏转角度与探测器之间的变换关系。由于装调原因,相机的坐标系与快速反射镜的机械轴坐标系并不是重合的,实验

忽略像旋因素,则两个坐标系之间存在角度偏转示意图如图4所示,因此进入跟踪过程之后,需要对坐标系进行旋转变换。

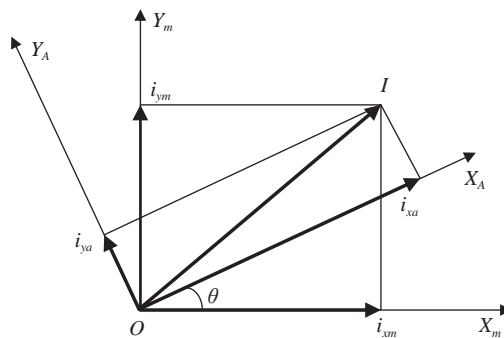


图 4 解耦坐标系旋转示意图

Fig.4 Rotation diagram of decoupling coordinate system

图4中, $OX_A Y_A$ 表示快速反射镜的机械轴坐标系, $OX_m Y_m$ 表示相机的坐标系,则矢量 I 在 $OX_A Y_A$ 坐标系下的分量 i_{xa} 、 i_{ya} 投影到 $OX_m Y_m$ 坐标系下的分量 i_{xm} 、 i_{ym} 的变换公式为:

$$\begin{bmatrix} i_{xm} \\ i_{ym} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{xa} \\ i_{ya} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: θ 为两个坐标系的夹角; $H \in R^{2 \times 2}$ 为增益矩阵。实际标定过程中,首先保持粗跟踪在一个固定的俯仰角,分别对快速反射镜的 X 轴和 Y 轴施加等间距的电压值,记录快速反射镜的偏转角度信息和相机脱靶量信息;其次,调整粗跟踪俯仰角度,重复上述测量过程;最后,整理标定数据,辨识过程的评价方程以误差均方根值为参考,离线辨识得到增益矩阵参数。

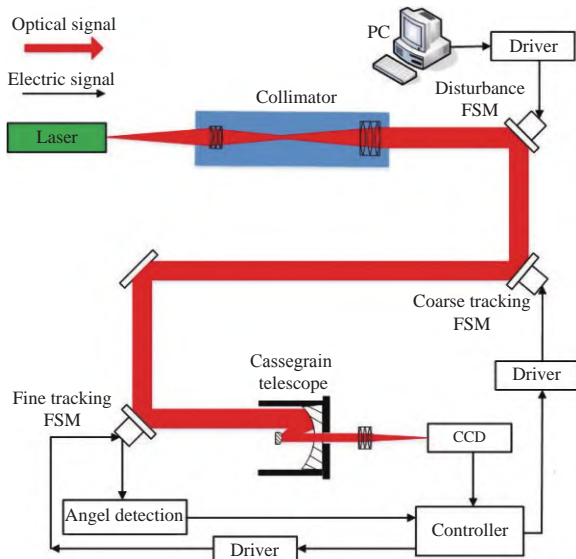
4 仿真实验及验证

为了验证自适应卡尔曼滤波算法和解耦算法在实际工程中的可行性,模拟实际应用场景搭建了一套桌面实验系统用来测试光电系统的跟踪精度。桌面实验平台利用笔者单位自研的快速反射镜模拟实际使用场景中的粗跟踪系统,与真实实验相比,均能实现大范围扫描、捕获和跟踪的功能,完成方位和俯仰大范围运动。虽然与实际工程中的驱动方式存在差异,但不影响其扫描、捕获和跟踪等功能实现,桌面实验系统原理图如图5(a)所示。图5(b)为实验平台实物图,实验系统主要包括激光器、扰动机构、粗跟踪

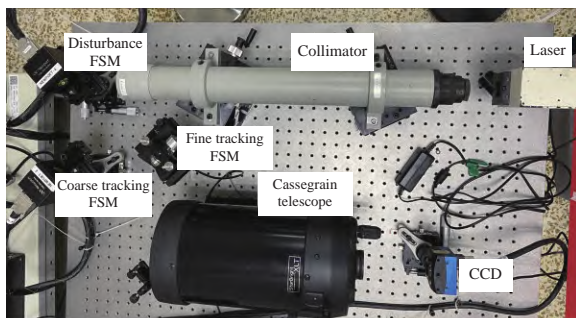
快反镜、精跟踪快反镜和 CCD 相机等。激光器为红光激光器, 波长 635 nm, 指向稳定精度小于 50 nrad。扰动器件选择型号为 FSM-300 来自 Newport 公司的快速反射镜, 行程为 ± 26.2 mrad。粗跟踪快反镜为笔者单位自行研制, 行程为 $\pm 2^\circ$, 分辨率为 4 μ rad。精跟踪快反镜使用 PI(Physik Instrumente) 公司的 S-330 型号产品, 行程为 ± 1 mrad, 分辨率为 0.05 mrad, 精跟踪快速反射镜的角度偏转信息可通过其产品内部应变片的电压获得。探测器选用德国 MIKROTRON 公司的 MC1362 相机, 像元尺寸为 14 μ m \times 14 μ m, 粗跟踪过程的视场大小为 1024 \times 1024 pixel, 帧频为 100 Hz; 精跟踪过程的视场大小为 256 \times 256 pixel, 帧频为 1 kHz。

为了验证文中提出的自适应卡尔曼滤波算法的有效性。文中通过控制实验平台扰动快速反射镜的

偏转角度使得光斑在探测器上运动, 采集一段脱靶量实际测量数据, 采样频率为 100 Hz, 将采集到的数据利用 Matlab 进行数据处理, 以此来验证卡尔曼滤波算法的准确性。测试过程中, 先让光斑在探测器上做匀速运动, 再做圆周运动; 采集得到脱靶量数据后分别用常规卡尔曼算法和自适应卡尔曼算法进行处理。方位-俯仰二维目标轨迹图和两种算法的估计结果如图 6 所示, 从图中可以明显看出, 采用常规卡尔曼算法和自适应卡尔曼算法估计曲线与真实曲线的接近程度, 使用自适应卡尔曼算法估计曲线更接近于实际曲线。



(a) 实验系统原理图
(a) Schematic diagram of experimental system



(b) 实验平台实物图
(b) Physical map of experimental platform

图 5 解耦实验系统图

Fig.5 Diagram of decoupling experimental system

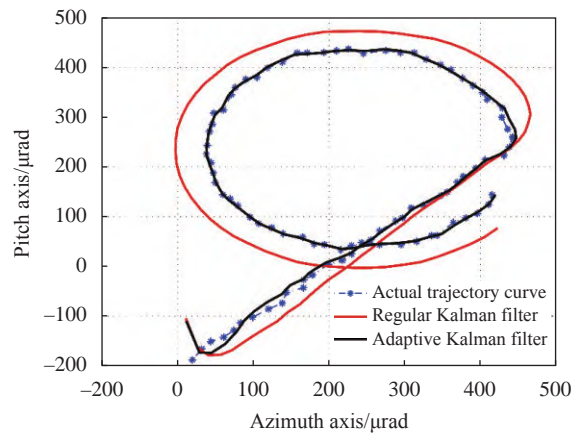


图 6 方位-俯仰二维轨迹图

Fig.6 Azimuth-pitch two-dimensional trajectory curve

图 7 为方位角度和俯仰角度的跟踪轨迹以及轨迹误差。常规卡尔曼算法和自适应卡尔曼算法均对实际曲线有估计效果, 常规卡尔曼滤波算法的方位轴最大估计误差为 65.8 μ rad, 误差均方根值为 35.7 μ rad, 俯仰轴最大估计误差为 80.2 μ rad, 误差均方根值为 37.8 μ rad; 自适应卡尔曼滤波算法的方位轴最大估计误差为 9.1 μ rad, 误差均方根值为 3.2 μ rad, 俯仰轴最大估计误差为 22.4 μ rad, 误差均方根值为 10.1 μ rad。自适应卡尔曼算法相比于常规卡尔曼滤波算法, 方位轴误差最大值降低了 86.1%, 误差均方根值降低了 91%, 俯仰轴误差最大值降低了 72.1%, 误差均方根值降低了 73.2%。特别是在曲线位置出现拐点处, 自适应卡尔曼滤波算法的估计值明显优于常规卡尔曼滤波算法。这是因为拐点处的噪声特性发生较大的变化, 传统的算法无法做出相应调整, 而自适应卡尔曼

滤波算法根据噪声残差的方差理论值与噪声残差的方差实际值的误差不断地对测量噪声方差矩阵进行

调整。因此,自适应卡尔曼滤波算法能适应更复杂的场景,并且估计值也更为准确。

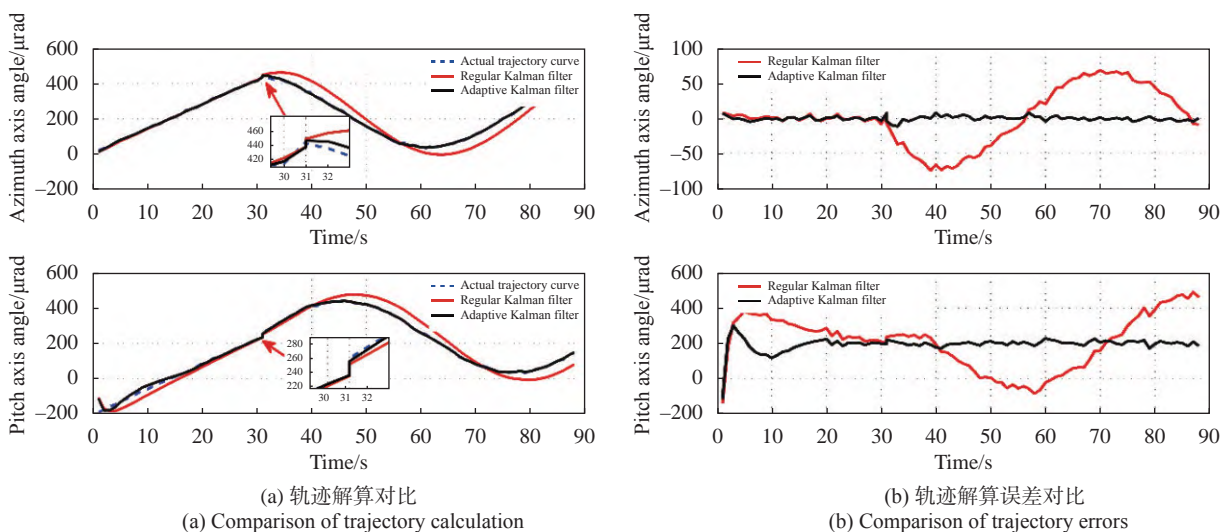


图 7 常规卡尔曼算法和自适应卡尔曼算法估计结果对比

Fig.7 Comparison of calculation results between traditional Kalman algorithm and adaptive Kalman algorithm

为了验证自适应卡尔曼滤波解耦算法的可行性,在桌面实验平台进行解耦跟踪实验,单探测器复合轴解耦跟踪实验测试主要分为两部分:首先,粗跟踪系统对目标进行扫描与捕获过程,目标进入粗跟踪视场,由粗跟踪快反镜和探测器组成闭环反馈系统,对光斑进行初步跟踪;其次,目标进入精跟踪视场,探测器切换到小视场状态,粗跟踪位置引导由精跟踪偏转角度解耦获得,精跟踪系统引导粗跟踪系统完成复合轴工作模式。模拟扰动源的幅值为 ± 1 mrad,测试不同扰动频率条件下跟踪系统的动态性能。解耦跟踪实验过程中,分别进行传统双探测器复合轴精跟踪测试和单探测器复合轴解耦测试。整个跟踪测试过程,可以通过 CCD 相机观察到光斑的位置和相机视场大小的变化,以此判断是否进行了有效的跟踪过程。分别对解耦实验系统施加频率为 0.1 Hz 和 0.5 Hz、幅值为 1 mrad 的正弦扰动信号,并对比未加入解耦算法和加入解耦算法的精跟踪快速反射镜的行程与光电系统的跟踪误差。图 8(a) 和 (b) 为精跟踪快速反射镜行程轨迹图,图中的前半部分“Without decoupling

algorithm”表示传统双探测器算法,后半部分“With decoupling algorithm”表示单探测器算法,由图中可以看出,加入解耦算法的精跟踪系统相对行程相比于未加入解耦算法明显缩短。根据实验数据结果可得:在 0.1 Hz 扰动条件下,行程的均方根值由 459.3 μrad 下降至 23.5 μrad ;在 0.5 Hz 扰动条件下,行程的均方根值由 459.7 μrad 下降至 89.2 μrad 。这说明光电跟踪系统在同等扰动条件下,加入解耦算法后,精跟踪系统的可调整范围缩小,间接证明了光电跟踪系统能够抑制幅度更大的扰动,单探测器复合轴解耦控制确实提高了光电跟踪系统的抗干扰能力。图 8(c) 和 (d) 为跟踪误差对比图,从实验结果可以看出,单探测器复合轴在同等扰动条件下的跟踪误差要小于传统双探测器复合轴的跟踪误差。根据实验结果计算可得:在 0.1 Hz 扰动条件下,均方根值由 2.54 μrad 下降到 0.86 μrad ;0.5 Hz 扰动条件下,均方根值由 9.28 μrad 下降到 3.64 μrad 。通过误差对比曲线验证了文中之前的单探测器复合轴理论分析,误差结果也表明单探测粗精解耦控制能够提高光电跟踪系统的跟踪精度。

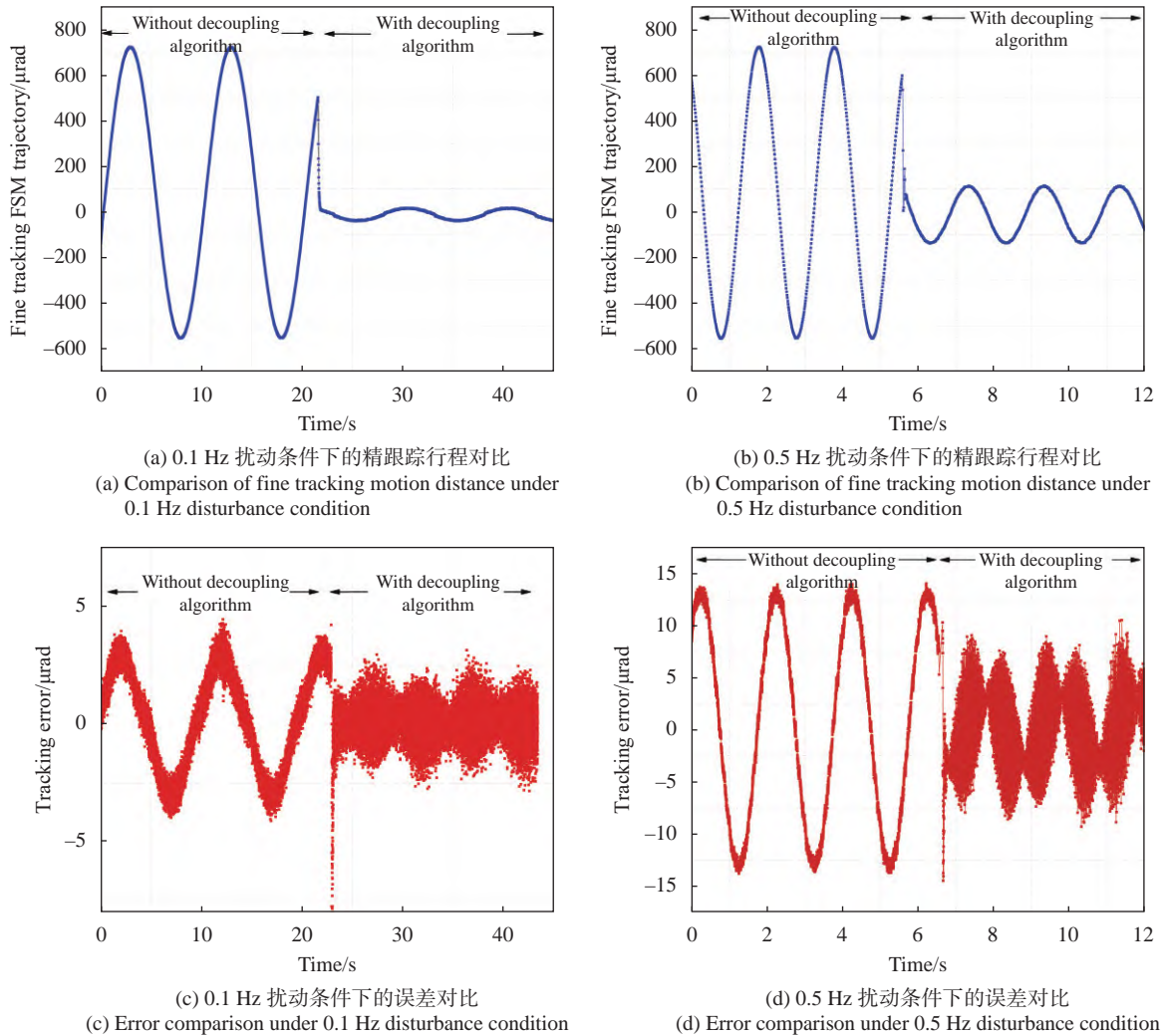


图 8 解耦跟踪实验结果对比

Fig.8 Comparison of decoupled tracking experimental results

5 结 论

文中对单探测器复合轴跟踪的控制系统进行了介绍。首先,介绍了单探测器复合轴跟踪系统的组成结构,并基于现代控制理论对误差传递函数进行分析;其次,针对探测器存在脱靶量滞后的现象以及出现目标短暂丢失的情况,提出一种自适应卡尔曼滤波算法;最后,根据坐标系的角度偏转关系,给出单探测器解耦矩阵的计算方法。仿真和实验结果表明:基于自适应卡尔曼滤波算法能够准确估计目标的轨迹曲线,尤其在轨迹拐点处的准确性明显优于传统卡尔曼算法;桌面实验充分验证了单探测器复合轴解耦跟踪原理,在 0.1 Hz 扰动条件下,精跟踪快速反射镜的行程均方根值由 459.3 μrad 下降至 23.5 μrad ,跟踪精度

由 2.54 μrad 提高到 0.86 μrad ,单探测器复合轴跟踪原理得到验证,对单探测器算法在工程中的实际应用起到促进作用。

参考文献:

- [1] Dong Q R, Chen T, Gao S J, et al. Progress of research on satellite-borne laser communication technology [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1260-1270. (in Chinese)
- [2] Ma Jianguang, Tang Tao. Review of compound axis servomechanism tracking control technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 218-227. (in Chinese)
- [3] Yenchesky L, Cierny O, Grenfell P, et al. Optomechanical design and analysis for nanosatellite laser communications[C]// Proceedings of the 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2019.

- [4] Voisinet L. Control processing system architecture for the optical communications demonstrator [C]//Proc SPIE, 1994, 2123(2): 451-458.
- [5] Carrizo C, Knappek M, Horwath J, et al. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations[C]//Proc SPIE, 2020, 11272: 1127203.
- [6] Yang S T, He L Q. Some problems of the design of compound-axis servomechanism using single detector [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4): 457-462. (in Chinese)
- [7] Song Y S, Tong S F, Dong Yan, et al. Technique of compound axis control using single detector based on field programmable gata array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0406001. (in Chinese)
- [8] Wang W B, Jiang Z H, Wang T F, et al. Opto-electrical compound axis tracking control technology on satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4133-4139. (in Chinese)
- [9] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35-45.
- [10] Imani M, Dougherty E R, Braga-Neto U. Boolean Kalman filter and smoother under model uncertainty [J]. *Automatica*, 2019, 111: 108609.
- [11] Mu Shaoshuo, Qiao Chuan. Ground-target geo-location method based on extended Kalman filtering for small-scale airborne electro-optical platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0528001. (in Chinese)
- [12] Yang Hongtao, Gao Huibin, Liu Xin. On-axis tracking technology based on the dual extended Kalman filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0531001. (in Chinese)
- [13] Wang Wei, Ji Yi, Shi Zhongjiao, et al. EKF-based scaling factor identification for strap-down seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0417003. (in Chinese)
- [14] Zheng Binqi, Li Baoqing, Liu Huawei, et al. Distributed target tracking based on adaptive consensus UKF [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 260-270. (in Chinese)
- [15] Xu Chao, Gao Min, Yang Yao. Accurate local region prediction by precise motion model in Kalman-particle filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3475-3482. (in Chinese)
- [16] Rui Y, Wang M, Li L, et al. Robust predictive current control of PMLSM with extended state modeling based Kalman filter: For time-varying disturbance rejection [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(2): 2208-2221.
- [17] Zhang Weiming, Shi Zelin, Ma Depeng. Control method of high accuracy video-stabilization with airstream disturbance for opto-electronic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1013008. (in Chinese)