

文章编号 1004-924X(2017)02-0519-10

舰载光电跟踪设备的目标预测算法研究

周俊鹏^{1,2*}, 陈 健¹, 李 焱¹, 董宇星¹, 陈 娟¹, 赵 岩³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 舰载光电跟踪设备在跟踪百公里以上的目标时, 由于受到障碍物干扰, 目标有时可能从视场中丢失, 需采用记忆跟踪算法对目标的未来时刻位置进行预测, 重新找回目标。常规的 CA、CV 模型预测目标时忽略了残差, 记忆跟踪时间短, 从而造成预测目标不够精确。针对以上问题, 提出了 Kalman 目标预测模型, 延长记忆跟踪时间。首先, 由船地坐标转换公式推导了甲板坐标系下船摇速度, 前馈到伺服控制系统速度回路中, 保证视轴自稳定, 同时提高跟踪精度; 其次, 概述了 CA、CV、Kalman 目标预测模型; 最后, 重点论述了 3 种目标预测模型记忆跟踪和实时雷达引导二维位置信息之间的关系。试验结果表明, 本文由于引入了 Kalman 目标预测模型, 使得记忆跟踪时间比传统的 CA、CV 模型的预测目标时间提高了一个数量级。解决了工程中舰载光电跟踪设备受船摇影响时跟踪精度低和记忆跟踪时间短的问题。

关键词: 三自由度船摇自稳定模型; CV 模型; CA 模型; Kalman 模型

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20172402. 0519

Research on target prediction algorithm of shipboard photoelectric tracking equipment

ZHOU Jun-peng^{1,2*}, CHEN Jian¹, LI Yan¹, DONG Yu-xing¹, CHEN Juan¹, ZHAO Yan³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

* Corresponding author, E-mail: zhoujunpeng_g123@163.com

Abstract: When shipboard photoelectric tracking equipment traces target more than 100 km away from it, because of disturbance of barrier, target is often lost from field of view. Under this condition, memory track algorithm shall be adopted to predict location of target at future time to re-find target. Conventional CA and CV models ignore residual error when predicting target, and memory track time is short, which causes insufficient accuracy of target predicted. In consideration of above problems, Kalman target prediction model was put forward to lengthen memory track time. Firstly, this paper derived boat-swing velocity under deck coordinate system from ship-earth coordinate transformation formula, performed feedforward to velocity loop of servo control system to guarantee self-stabilization of optical axis and improve tracking accuracy simultaneously; sec-

收稿日期: 2016-04-18; **修订日期:** 2016-06-12.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006aa701410) 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

only, CA, CV and Kalman target prediction models were described; finally, 2-dimension position information relationship between memory tracking of 3 kinds of target prediction models and real-time radar guidance location was mainly discussed. Test results show that compared with traditional CA and CV models, target prediction time of proposed method is improved more than an order of magnitudes, that's because Kalman target prediction model is introduced in this paper. The problem in project that tracking accuracy of shipboard photoelectric tracking equipment will be low and memory tracking time will be short when it is affected by boat-swing is solved.

Key words: three degree of freedom model of ship swing self-stability; CV model; CA model; Kalman model

1 引 言

船摇状态下,视轴自稳定是实现精确目标预测的前提。视轴自稳定技术已经在光电跟踪设备中得到了广泛应用^[1-2],其基本思想就是通过船地坐标变换,得到惯导平台下角速度,再将其前馈到光电伺服控制系统的速度回路中^[3]。常规的速度前馈技术通常采用 CA(constant acceleration)滤波模型,即利用 CA 模型将最小二乘法求出的惯导速度数据前馈到速度回路中,处在半自动目标搜索时,其在稳定捕获跟踪目标的同时,缩短了雷达引导偏差过大情况下的目标稳定捕获时间,提高了光电对抗能力^[4-7]。在控制策略上,大部分舰载光电跟踪设备双闭环伺服控制系统中的跟踪架传递函数近似为一阶惯性环节,所以将位置环、速度环调节器设计为滞后超前控制器,其不需采用复杂的最优控制算法^[8-10],而是结合速度前馈实现复合控制,提高跟踪精度,为目标预测提供稳定的跟踪平台。在稳定控制的基础上获得准确的目标距离值能够更准确地预测目标位置。基于此,文献^[11-13]提出了惯导平台下舰载光电设备的舷角正交测距技术,通过速度滤波前馈实现电视闭环稳定跟踪并结合“舷角正交”测量技术,实现舰面环境下的目标测距,在海天环境下测距距离可达 30 km。为准确预测目标位置提供了有利保证^[14-17]。

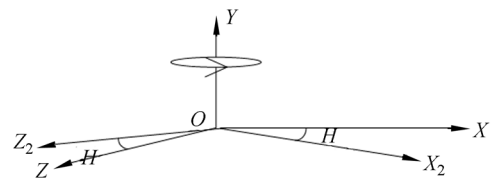
本文采用坐标变换,将视轴自稳定公式导入 MATLAB 中,模拟 5 级海况,研究速度顺馈对光电跟踪设备跟踪误差的影响,然后,将实测目标跟踪误差数据导入 MATLAB 中,得到实际方位和俯仰跟踪误差仿真图,在视轴自稳定的基础上提出了 Kalman 目标预测模型,该模型比传统的常速度模型(constant velocity, CV)、CA 模型的记

忆跟踪时间更长。

2 三自由度船摇自稳定系统模型

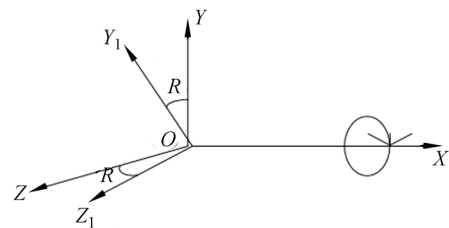
2.1 大地直角坐标变换为甲板直角坐标

设横摇角度为 R , 艏摇角度为 H , 纵摇角度为 P , 见图 1, 以下各个坐标变换均为矢量合成。



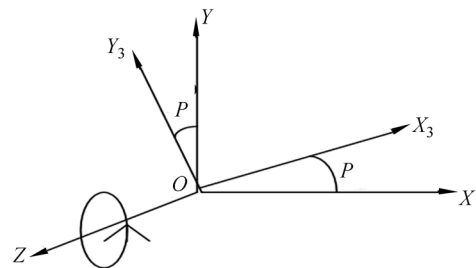
(a) 艏摇 H 时

(a) The yawing of H



(b) 横摇 R 时

(b) The rolling of R



(c) 纵摇 P 时

(c) The pitching of P

图 1 坐标旋转图

Fig. 1 Coordinate rotation graphs

根据图 1(a)可以得到 $Y_1 = Y \cos R + Z \sin R$, $Z_1 = Z \cos R - Y \sin R$,从而得到横摇变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & \sin R \\ 0 & -\sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

根据图 1(b)可以得到 $X_2 = X \cos H + Z \sin H$, $Z_2 = Z \cos H - X \sin H$,从而得到艏摇变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos H & 0 & \sin H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin H & 0 & \cos H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & \sin R \\ 0 & -\sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y \\ Z_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

2.2 船摇位置自稳定模型

大地直角坐标系见图 2。

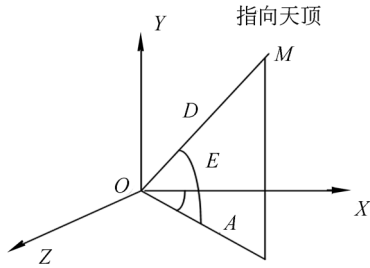


图 2 大地直角坐标系

Fig. 2 Rectangular coordinate of the earth

由图 2 可得到公式(5):

$$\begin{cases} X = D \cos E \cos A \\ Y = D \sin E \\ Z = D \cos E \sin A \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} A_c = \arctan(Z_c / X_c) = \arctan\{[\cos E[\cos R \sin(A-H) + \sin R \sin P \cos(A-H)] - \sin E \sin R \cos P] / [\cos E \cos P \cos(A-H) + \sin E \sin P]\} \\ E_c = \arcsin\{\cos E[\sin R \sin(A-H) - \cos R \sin P \cos(A-H)] + \sin E \cos R \cos P\} \end{cases}, \quad (6)$$

公式中: A_c 为甲板坐标系下的方位角, E_c 为甲板坐标系下的俯仰角。

2.3 甲板坐标系下的船摇速度

求解甲板坐标下船摇速度的方法有两种:第一种方法为将公式(6)中甲板坐标系下的方位角和俯仰角对时间求导,即可得到甲板坐标系下的方位和俯仰角速度,此方法计算繁琐不利于工程

实现。第二种方法为通过坐标变换得到甲板坐标系下的船摇角速度,再将船摇角速度变为视轴扰动速度。角速度坐标变换次序如图 4 所示。

根据图 1(c)可以得到 $X_3 = X \cos P + Y \sin P$, $Y_3 = Y \cos P - X \sin P$,从而得到纵摇变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

这样采取先艏摇再纵摇后横摇的旋转顺序就可得到三自由度大地直角坐标 $[X \ Y \ Z]$ 到甲板坐标 $[X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ 系下的坐标变换为公式(4):

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos H & 0 & \sin H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin H & 0 & \cos H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: X, Y, Z 为大地直角坐标系下的坐标分量; A, E 为大地坐标系下的方位和俯仰角度值,坐标原点到目标的距离 $OM = D$ 。图 3 为甲板直角坐标系。

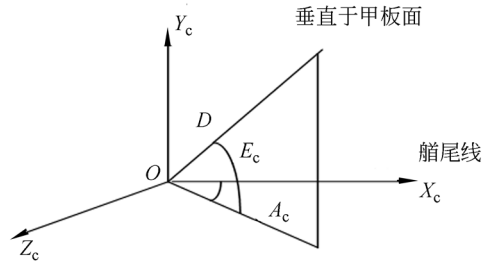


图 3 甲板直角坐标系

Fig. 3 Rectangular coordinate of the deck

由图 3 和公式(5)再结合三自由度大地直角坐标系到甲板直角坐标系的变换公式,可得到船摇位置自稳定模型,如公式(6)所示:^[3]

实现。第二种方法为通过坐标变换得到甲板坐标系下的船摇角速度,再将船摇角速度变为视轴扰动速度。角速度坐标变换次序如图 4 所示。

图 4(a)中,横摇角度 H 俯视顺时针为正向,则艏摇角速度 ω_H 的方向与 Y 轴正向相反,取负。图 4(b)中在 $Y_1 Y X_c$ 平面上,将 $-\omega_H$ 在 Y_1 轴和 X_c 轴上正交分解即可求出 Y_1 轴和 X_c

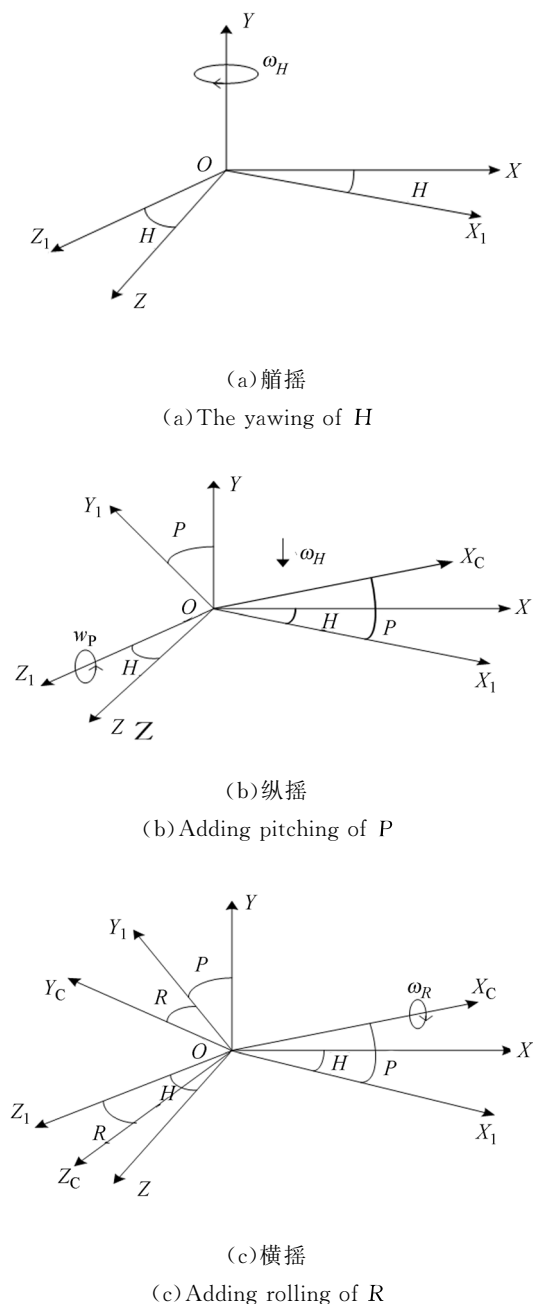


图 4 大地船摇速度转为甲板船摇速度

Fig. 4 Velocity in geodetic coordinate system converted to deck coordinate system

轴上的角速度, $\omega_{Y_1} = -\omega_H \cos P$ 、 $\omega_{X_c} = -\omega_H \sin P$ 。同理,由图 4(c)进行角速度矢量分解合成可得到大地船摇速度转为甲板船摇速度的公式(7):

$$\begin{cases} \omega_{X_c} = \omega_R - \omega_H \sin P \\ \omega_{Y_c} = \omega_P \sin R - \omega_H \cos P \cos R, \\ \omega_{Z_c} = \omega_P \cos R + \omega_H \cos P \sin R \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_{X_c} 、 ω_{Y_c} 、 ω_{Z_c} 分别为甲板坐标系下横摇、纵摇、艏摇角速度。 ω_R 、 ω_H 、 ω_P 分别为大地坐标系下的横摇、艏摇、纵摇角速度。

2.4 甲板船摇速度变换为视轴扰动速度

图 5 为甲板船摇速度转换为视轴扰动速度示意图。

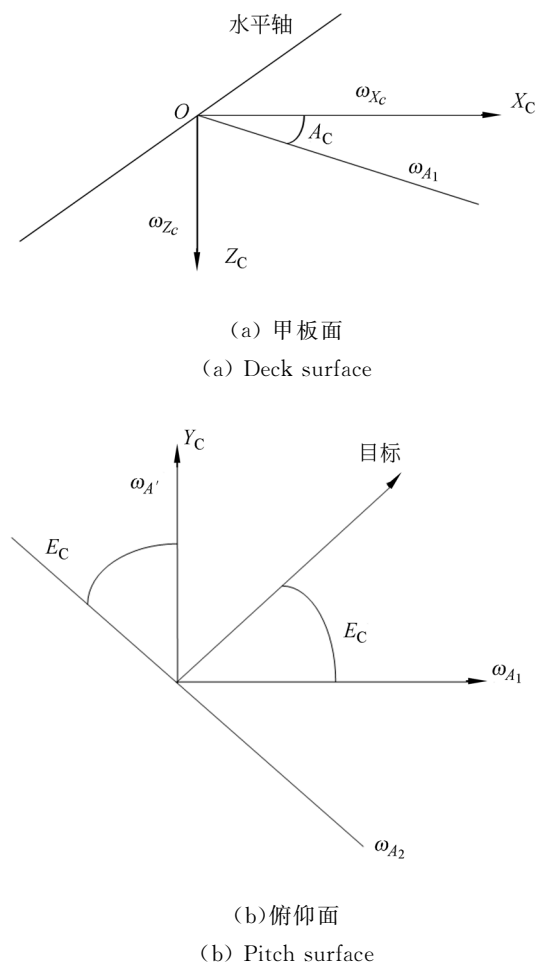


图 5 甲板船摇速度转换为视轴扰动速度

Fig. 5 Disturbance velocity in visual axis converted from boat-swing velocity

由图 5(a)可得到甲板坐标系下的俯仰角速度 $\dot{E} = \omega_{X_c} \sin A_c - \omega_{Z_c} \cos A_c$ 和 $\omega_{A_1} = \omega_{X_c} \cos A_c + \omega_{Z_c} \sin A_c$ 。由图 5(b)可知,在甲板俯仰面内 ω_{A_2} 垂直视轴, ω_{A_1} 在 ω_{A_2} 方向上的投影 $\omega_{A_1} \sin E_c$ 将引起视轴横向移动,可由垂直轴产生补偿分量 $\omega_{A'}$,使 $\omega_{A_1} \cos E_c - \omega_{A_1} \sin E_c = 0$,又有 $\dot{A} = \omega_{Y_c} - (\omega_{X_c} \cos A_c + \omega_{Z_c} \sin A_c) \tan E_c$,再结合公式(7)可得到船摇速度自稳定公式,如公式(8)所示:

$$\begin{cases} \dot{E}_c = -(\omega_p \cos R + \omega_H \cos P \sin R) \cos A_c + \\ \quad (\omega_R - \omega_H \sin P) \sin A_c \\ \dot{A}_c = \omega_p \sin R - \omega_H \cos P \cos R - \tan E_c \\ \quad [(\omega_R - \omega_H \sin P) \cos A_c + \omega_p \cos R + \\ \quad \omega_H \cos P \sin R] \sin A_c \end{cases}, \quad (8)$$

式中: \dot{A} 为甲板坐标系下的方位角速度, \dot{E} 为甲板坐标系下的俯仰角速度。

3 目标预测

3.1 目标 singer 模型建立

目标在方位和俯仰两个方向上的运动可以看成是相互独立的,假定在 t_i 时刻经过图像处理得到目标在方位和俯仰两个方向上的脱靶量 $\Delta x(t_i)$ 和 $\Delta y(t_i)$,将 t_i 时刻的编码器值与脱靶量值相加后得到带有观测误差的目标位置值 $\theta_x(t_i)$ 和 $\theta_y(t_i)$ 。以方位运动为例建立目标运动模型,选择目标在方位方向的角位置 θ_x 、角速度 $\dot{\theta}_x$ 、角加速度 $\ddot{\theta}_x$ 作为状态变量,则机动目标在方位方向运动的状态方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \theta_x(t_{i+1}) \\ \dot{\theta}_x(t_{i+1}) \\ \ddot{\theta}_x(t_{i+1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x(t_i) \\ \dot{\theta}_x(t_i) \\ \ddot{\theta}_x(t_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{bmatrix} \bar{a}(t_i) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega(t_i)$$

其中, $\theta_x(t)$ 为目标位置, $\dot{\theta}_x(t)$ 为目标速度, $\ddot{\theta}_x(t)$ 为目标加速度。

离散后的状态方程为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}(k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k) \bar{a} + \mathbf{W}(k),$$

其中:

$$\mathbf{X}(k) = [x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)]^T;$$

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}}{\alpha^2} \\ 0 & 1 & \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\text{式(9)中, } \lim_{\alpha \rightarrow 0} \mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 为 CA}$$

模型;

$$\lim_{\alpha \rightarrow +\infty} \mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 为 CV 模型。}$$

3.2 CA 模型和 CV 模型的工程实现

传统的舰载光电跟踪设备常常采用常速度和常加速度模型进行目标预测。方位和俯仰两个方向预测方法一样。现以方位方向的预测为例进行说明。本工程中采样周期 $T=0.0625$ s。通过光电跟踪设备实测得到 t 时刻目标在方位方向的角位置为 $\theta(t)$ 、角速度为 $\dot{\theta}(t)$ 、角加速度为 $\ddot{\theta}(t)$,根据 CA 模型可得到 $t+T$ 时刻的方位角位置、角速度、角加速度预测公式,如公式(10)所示:

$$\begin{bmatrix} \theta(t+T) \\ \dot{\theta}(t+T) \\ \ddot{\theta}(t+T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中, $\theta(t+T)$ 、 $\dot{\theta}(t+T)$ 和 $\ddot{\theta}(t+T)$ 分别为 $t+T$ 时刻预测的方位角位置、角速度和角加速度值。同理可利用 CV 模型预测方位角位置和角速度值。如公式(11)所示:

$$\begin{bmatrix} \theta(t+T) \\ \dot{\theta}(t+T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

从式(10)和式(11)可以看出,采用常规的 CA 和 CV 模型预测目标时近似为泰勒级数展开,在工程中忽略了残差,从而造成预测不精确。

3.3 Kalman 滤波器模型

Kalman 滤波的信号方程与观测方程分别为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}(k, k-1) \mathbf{X}(k-1) + \mathbf{U}(k, k-1) \mathbf{W}(k-1); \mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k), k \geq 1$$

其中: $\mathbf{X}(k)$ 与 $\mathbf{Z}(k)$ 分别是状态向量和观测向量; $\mathbf{A}(k, k-1)$ 是状态转移矩阵, $\mathbf{U}(k, k-1)$ 是输入矩阵, $\mathbf{H}(k)$ 是观测矩阵; 动态噪声 $\mathbf{W}(k-1)$ 和观测噪声 $\mathbf{V}(k)$ 是互不相关的零均值白噪声序列,即 $P(\mathbf{W}(k)) \sim N(0, \mathbf{Q}(k))$, $P(\mathbf{V}(k)) \sim N(0, \mathbf{R}(k))$ 。在跟踪过程中,由于相邻两帧图像时间间隔短,跟踪距离很远,目标运动状态变化较小,故可认为目标在 x - y 二维直线运动中叠加入随机加速度扰动,加速度扰动随机量可表示为: $a(t) \sim N(0, \delta_w^2)$ 。

定义状态向量 $\mathbf{X}(k) = (x(k), v(x, k), y(k), v(y, k))^T$, 其中 $x(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示当前帧中观测到的目标中心位置在 x - y 二维坐标系

中的分量。在 x 方向上应用牛顿运动定理可得：

$$\mathbf{X}(k) = x(k-1) + v(x, k-1)T + \frac{1}{2}\omega(k-1)T^2$$

$$v(x, k) = v(k, k-1) + \omega(k-1)T$$

在 y 方向上也可得到类似的方程。

由以上方程可以得到状态转移矩阵 $\mathbf{A}(k, k-1)$ 、噪声矩阵 $\mathbf{U}(k, k-1)$ 和观测矩阵 $\mathbf{H}(k)$ ，分别为：

$$\mathbf{A}(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}(k, k-1) = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

其中 $T=0.0625\text{ s}$ 表示采样时间，初始值 $\mathbf{P}(0)$ 、 $\mathbf{R}(k)$ 和 $\mathbf{Q}(k)$ 分别为：

$$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 5 & 10 & 0 & 0 \\ 10 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 8 \\ 0 & 0 & 8 & 15 \end{bmatrix}, \mathbf{R}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

从以上理论分析可知：将加速度作为随机扰动的 Kalman 滤波模型，相对于匀加速的 CA 模型和匀速的 CV 模型而言，在目标预测方面可得到更高的精度。

3.4 卡尔曼滤波模型实现过程

3.4.1 卡尔曼滤波模型理论算法

预测协方差矩阵：

$$\mathbf{P}(k+1, k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{P}(k, k)\mathbf{A}^T(k+1, k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{W}(k)\mathbf{G}^T(k), \quad (12)$$

滤波增益矩阵：

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k+1, k)\mathbf{H}^T(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k+1, k) + \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{V}(k))^{-1}, \quad (13)$$

误差协方差矩阵：

$$\mathbf{P}(k, k) = \mathbf{P}(k+1, k) - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k+1, k), \quad (14)$$

Kalman 滤波器：

$$\mathbf{X}(k, k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{X}(k, k-1) + \mathbf{K}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{X}(k, k-1)), \quad (15)$$

Kalman 预测器：

$$\mathbf{G}(k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{P}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k+1, k)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{V}(k))^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k, k-1) = (\mathbf{A}(k, k-1) - \mathbf{G}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}(k-1, k-1)\mathbf{A}(k, k-1) + \mathbf{V}(k)$$

$$\mathbf{X}(k+1, k) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{X}(k, k-1) + \mathbf{G}(k) \cdot (\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{X}(k, k-1)). \quad (16)$$

3.4.2 卡尔曼滤波模型实现过程

Kalman 滤波器实现算法流程图，如图 6 所示。

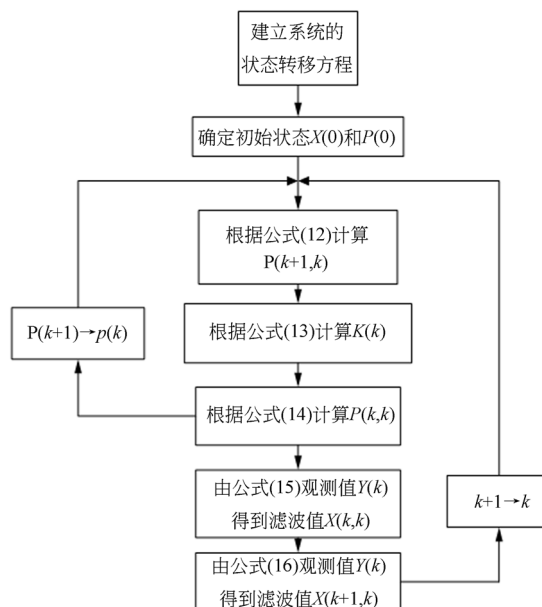


图 6 滤波器实现算法流程图

Fig. 6 Flow chart of algorithm realization in filter

主要过程如下：

Step1: 选择目标状态 $\mathbf{X}(k)$ ，根据目标的运动模型，确定状态转移方程 $\mathbf{A}(k+1, k)$ ；

Step2: 确定状态噪声和测量噪声，根据目标前 N 个时刻目标位置、速度和加速度数据，计算状态初始值 $\mathbf{X}(0)$ 和方差初始值 $\mathbf{P}(0)$ ；

Step3: 计算 k 时刻误差协方差矩阵 $\mathbf{P}(k)$ 和滤波增益矩阵；

Step4: 由公式 (15) 计算 k 时刻的状态滤波值；

Step5: 由公式 (16) 计算 $k+1$ 时刻的状态预

测值和方差预测值。

4 仿真与试验

4.1 船摇仿真与试验

以 5 级海况为例进行 MATLAB 仿真和外场试验。5 级海况摇摆参数为:

$$\begin{cases} R=0.35\sin(0.628t) \\ P=0.12\sin(0.785t) \\ H=0.3\sin(1.2t) \end{cases}$$

将 5 级海况摇摆参数和公式(6)以及公式(8)方位视轴自稳定速度公式导入 MATLAB 中进行计算,对比分析船摇速度直接求导法和坐标变换法,得到船摇速度的一致性,速度对比图如图 7 所示。

图 7(彩图见期刊电子版)中黄线为坐标变

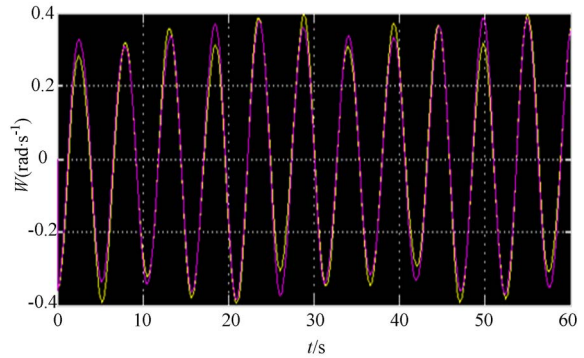


图 7 速度对比图

Fig. 7 Speed comparison graph

换视轴自稳定角速度曲线,紫线为公式(6)直接求导角速度曲线。从图 7 可知两种方法得到的结果基本一致,所以工程中采用坐标变换法是可取的。图 8 为有速度顺馈和无速度顺馈的双闭环光电伺服设备 MATLAB 仿真图。

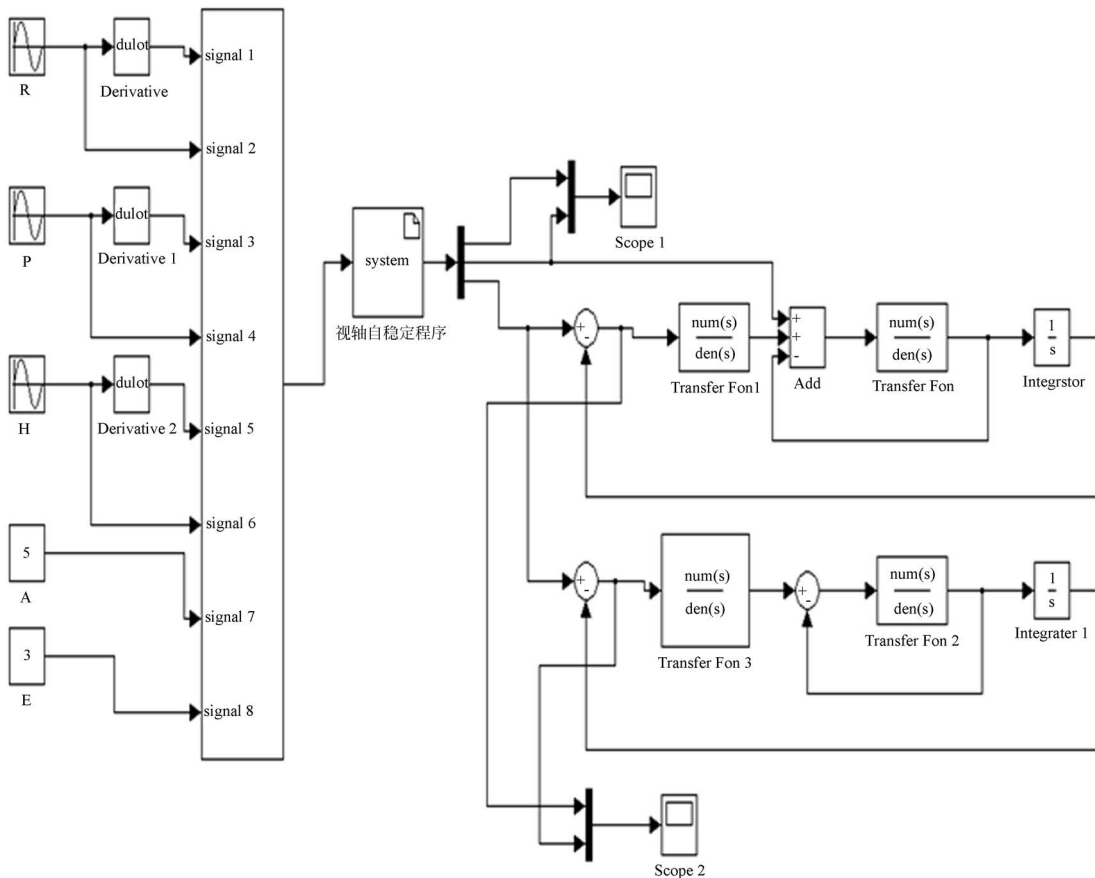


图 8 有/无速度顺馈的双闭环光电伺服设备的 MATLAB 仿真图

Fig. 8 MATLAB simulation for double closed-loop photoelectric servo device with/without velocity feedforward

从图 8 的 2 号示波器可得到有船摇速度顺馈 和无船摇速度顺馈时误差对比图 9。

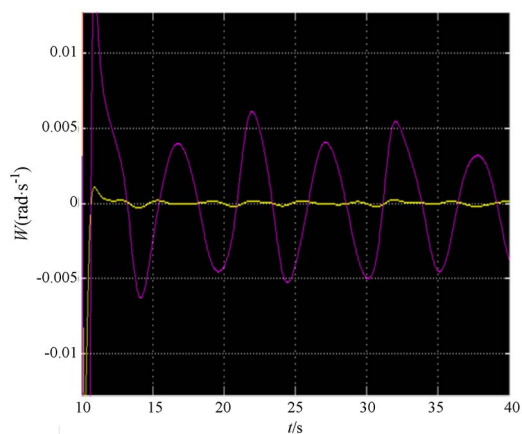


图 9 仿真误差对比图

Fig. 9 Comparison of simulation error

图 9(彩图见期刊电子版)中横坐标为时间轴,纵坐标为角位置误差轴。黄线为有船摇速度顺馈误差曲线,紫线为无速度顺馈误差曲线。去掉阶跃响应调节时间段,有速度顺馈时的最大误差为 $e_1 = 0.00018 \text{ rad}$,无速度顺馈的最大误差为 $e_2 = 0.00545 \text{ rad}$,所以隔离度为 $|20 \log \frac{e_1}{e_2}| = 29.62 \text{ dB}$ 。将外场红外二阶稳定跟飞实测跟踪误差数据导入 MATLAB 中,可得到实际跟踪飞机时的方位和俯仰误差图 10 和图 11。

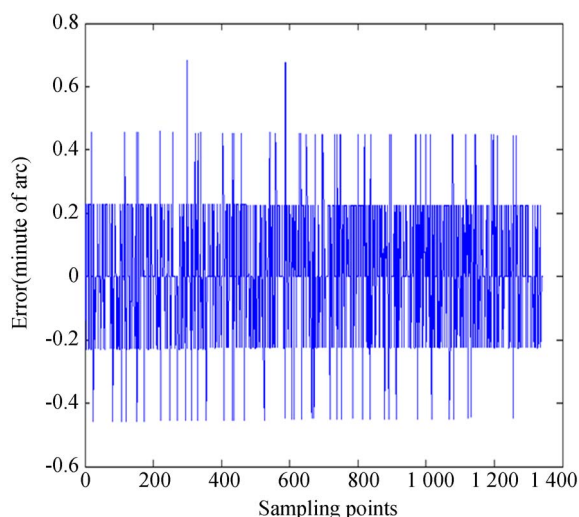


图 10 方位误差图

Fig. 10 Azimuth errors

从图 10 和图 11 可知,方位均方根误差为 $0.182'$,俯仰均方根误差为 $0.435'$,完全符合工程指标 $2'$ 的要求。

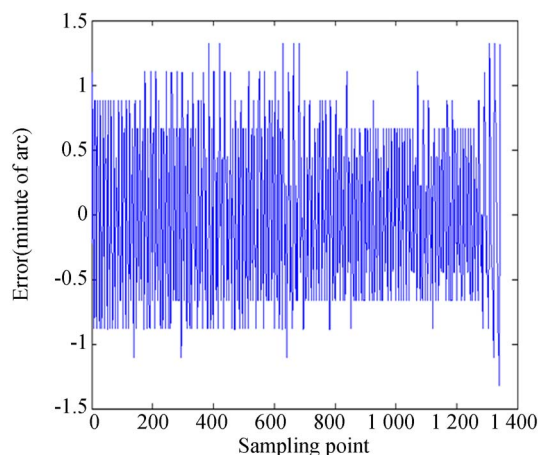


图 11 俯仰误差图

Fig. 11 Pitch errors

4.2 目标预测分析与试验

外场试验时,主控计算机实时存储跟踪目标方位角和俯仰角数据,最后从存储的方位和俯仰角数据中截取前 100 组作为依据,对未来 100 场方位和俯仰角进行预测。前 100 组数据的采样时间为 0.0625 s ,为了和雷达时间戳对应,将 6.25 s 时雷达引导时间作为未来 100 场目标角度预测值的起始时间。将 CA、CV 以及 Kalman 公式在 MATLAB 中编写成预测.m 文件,将前 100 组实测数据导入 MATLAB 中,调用预测.m 文件得到预测角位置曲线与 100 场后实时雷达引导角位置数据对比,可得到目标预测对比图 12 和图 13。

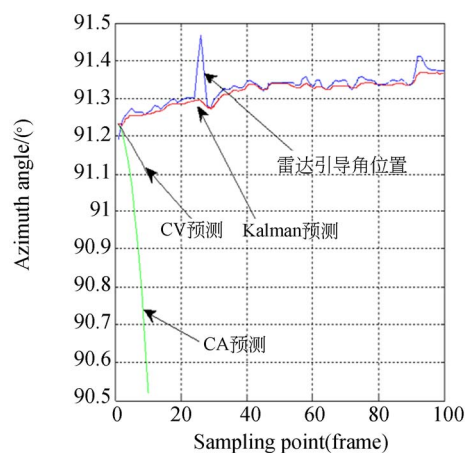


图 12 方位预测对比图

Fig. 12 Comparison of azimuth angles predicted by different methods

图 12(彩图见期刊电子版)和图 13(彩图见期刊电子版)中横坐标代表采样点数 100 帧,纵坐标

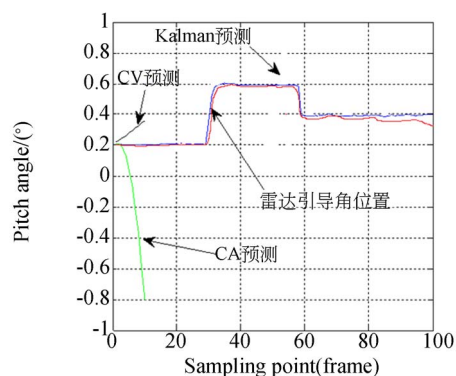


图 13 俯仰预测对比图

Fig. 13 Comparison of pitch angles predicted by different methods

代表角度值。蓝线表示雷达引导时光电跟踪设备跟踪目标角度、红线表示 Kalman 滤波预测角度、黑线表示 CV 模型预测角度、绿线表示 CA 模型预测角度。本工程中主控系统的执行周期为 16 Hz, 所以从图 12 和图 13 可知, 6 场后, 即 0.375s 以后, CA 模型和 CV 模型的方位和俯仰预测角度值均大幅度偏离雷达实时引导角度值, 而采用卡尔曼预测模型则可以很好地预测目标角位置。从图中还可知, 6.25s 内的预测目标角位置值和实时雷达引导角度值基本吻合, 所以在目标丢失 6.25s 之内可以采用卡尔曼目标预测模型继续跟

参考文献:

- [1] 张玉良, 耿天文, 刘永凯. 动基座光电平台视轴自稳定控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9):38-42.
ZHANG Y L, GENG T W, LIU Y K. Optical axis self-stabilization control system's design for moving base optical-electrical table[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, 34(9): 38-42. (in Chinese)
- [2] 葛兵, 高慧斌, 余毅. 光电着舰引导系统的视轴稳定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6):1577-1583.
GE B, GAO H B, YU Y. LOS stabilization of optoelectronic landing system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1577-1583. (in Chinese)
- [3] 王凤英. 舰载电视跟踪仪自稳定问题研究[D]. 大连:大连海事大学, 2005.
WANG F Y. *Study on the Self-stabilization Problem of the Shipborne TV Tracker* [D]. DaLian: DaLian Maritime University, 2005. (in Chinese)
- [4] 李焱, 陈涛, 曹立华. 舰载光电设备跟踪掠海目标的控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):936-941.
LI Y, CHEN T, CAO L H. Control of ship-based optoelectronic equipment for tracking near-sea targets[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 936-941. (in Chinese)
- [5] 刘挺霞, 王伟国, 陈建. 车载惯性平台稳定位置解算算法[J]. 中国光学, 2012, 5(5):537-543.
LIU T X, WANG W G, CHEN J. Position arithmetic for a vehicular inertial stabilized platform[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5):537-543. (in Chinese)
- [6] 葛兵, 高慧斌. 舰载跟踪设备视轴自稳定方法[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(6):93-96.
GE B, GAO H B. Stabilization of LOS for carrier-based theodolite[J]. *Ship Science and Technology*, 2006, 28(6):93-96. (in Chinese)
- [7] 李雪雷, 王志乾, 苏宛新, 等. 光电着舰测量设备甲板捷联式视轴稳定系统设计[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2014, 46(2):51-55. (in Chinese)
LI X L, WANG ZH Q, SU W X, et al.. A design of

踪目标。试验中发现, 对于 5 级以上的海况条件, 本文算法效果一般, 有待于进一步改进。

5 结 论

针对船摇状态下的精确目标预测, 本文在视轴自稳定的基础上, 提出了一种 Kalman 目标预测模型。通过模拟 5 级海况, 对比分析了本文方法、CA 方法、CV 方法的性能。试验表明, 将船地坐标转换视轴速度前馈到光电伺服跟踪设备速度环中, 可有效抑制 5 级海况状态下的船摇、纵摇、横摇对跟踪目标产生的不良影响, 其隔离度可达 29.62 dB, 解决了光电设备船摇时跟踪精度不高的难题。从仿真误差对比图中可知, 有速度前馈时本文方法的最大误差为 0.000 18 rad, 无速度前馈最大误差为 0.005 45 rad, 前者跟踪精度较后者提高了一个数量级。从实测误差图中得到方位均方根跟踪误差为 0.182', 俯仰均方根跟踪误差为 0.435', 可见速度前馈法在提高跟踪精度方面的优越性, 同时提出的卡尔曼目标预测模型使得记忆跟踪有效时间达 6.25s, 远优于传统的 CA, CV 目标预测模型的有效时间(0.375 s)。此方法有效可行、应用方便、提高了记忆跟踪的能力。

- photoelectric measuring equipment deck ship strap-down stabilization system [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 46(2): 51-55. (in Chinese)
- [8] FODERARO G, FERRARI S, WETTERGREN T A. Distributed optimal control for multi-agent trajectory optimization [J]. *Automatica*, 2014, 50(1): 149-154.
- [9] BREZAS P, SMITH M C, HOULT W. A clipped-optimal control algorithm for semi-active vehicle suspensions: Theory and experimental evaluation [J]. *Automatica*, 2015(53): 188-194.
- [10] INOUE M, WADA T, IKEDA M, et al.. State-space H-infinity controller design for descriptor systems [J]. *Automatica*, 2015(59): 164-170.
- [11] 蔡立华. 基于陀螺的舰载光电跟踪设备视轴稳定技术研究 [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
CAI L H. *The research of line of sight of gyro stabilization technology of Carrier-Based Electro-Optical Theodolite* [D]. ChangChun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [12] 刘翔. 舰载光电跟踪视轴稳定技术 [D]. 北京: 中国科学院光电技术研究所, 2013.
LIU X. *Technology of Line-of-sight(LOS) stabilization for ship-based photoelectric tracking* [D]. Beijing: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [13] 李焱, 张海波, 张强, 等. 惯导平台下舰载光电设备舷角正交测距技术 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(1): 8-14.
LI Y, ZHANG H B, ZHANG Q, et al.. Measuring distance technique of relative bearing orthogonal for shipborne optoelectronic equipment based on inertial navigation platform [J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(1): 8-14. (in Chinese)
- [14] 李焱. 舰载光电全息线控系统 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(3): 378-384.
LI Y. Full information display and control system for shipborne optical-electronic [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(3): 378-384. (in Chinese)
- [15] 李焱, 曹立华, 王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1126-1123.
LI Y, CAO L H, WANG D N. Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1126-1133. (in Chinese)
- [16] 周俊鹏, 李焱, 王一卉, 等. 舰载光电伺服设备的系统辨识研究 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(5): 73-79.
ZHOU J P, LI Y, WANG Y H, et al.. Shipboard photoelectric equipment servo system identification [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 73-79. (in Chinese)
- [17] 陈阳, 储海荣, 郭立红. 捷联导引头积分比例导引制导精度 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 290-295.
CHEN Y, CHU H R, GUO L H. Precision of integral proportion navigation guidance with strapdown seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 290-295. (in Chinese)
- [18] 王昊, 刘晶红, 邓永停, 等. 光电跟踪转台的控制模型辨识 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 177-183.
WANG H, LIU J H, DENG Y T, et al.. Control model identification of opto-electronic tracking turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 177-183. (in Chinese)

作者简介:



周俊鹏(1984—),男,吉林吉林人,博士研究生,2008、2015年于长春工业大学分别获得学士、硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事电子学设计、动机座光电系统伺服控制、快速反射镜伺服控制等技术的研究。E-mail: zhoujunpeng. g123@163.com



李焱(1980—),男,吉林长春人,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为电子学设计、舰载光电系统伺服控制、舰载光电对抗设备总体设计等技术研究。E-mail: liy211@163.com