

舰载光电设备视轴稳定技术研究

谢航^{1,2} 杨维帆¹ 李德全¹ 王栋¹

(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 100049)

摘要: 针对舰载光电设备的方位轴在摆动时受到船摇影响,造成视轴不稳定问题,改进了基于旋转矩阵的轴角补偿算法,推导出摆动状态下光电设备的俯仰轴角在地理系下维持稳定的关系式。利用仿真软件搭建算法模型并进行了仿真,仿真结果表明,改进后的轴角补偿算法能补偿船摇对舰载光电设备俯仰轴角的影响,从而证明改进后的轴角补偿算法的有效性。

关键词: 舰载光电设备; 光电摆扫; 视轴稳定 中图分类号: TP301.6 文献标识码: B

Research on Azimuth Axis Stabilization Technology of Shipboard Optoelectronic Equipment

XIE Hang^{1,2}, YANG Wei-fan¹, LI De-quan¹, WANG Dong¹

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

Changchun Jilin 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT: The azimuth axis of shipborne optoelectronic equipment is affected by ship rolling during swinging and sweeping, resulting in the instability of visual axis. An improved algorithm of axis Angle compensation based on rotation matrix is proposed to derive the relationship between the pitch axis Angle of photoelectric equipment and its stability in the geological system under the state of swing sweep. The simulation results show that the improved axis Angle compensation algorithm can compensate for the influence of ship rolling on the pitching axis Angle of shipborne optoelectronic equipment, thus proving the effectiveness of the improved axis Angle compensation algorithm.

KEYWORDS: Shipboard electro-optical equipment; Photoelectric pendulum sweep; Azimuth axis stabilization

1 引言

近年来,雷达和光电跟踪器的配合日益密切,尤其在水域感知技术中^[1]。雷达系统具有探测主动性,探索范围足够大,抗干扰能力强,不受天气及能见度影响。但缺点是无法对目标成像,目标的识别困难,细节分辨率能力不够^[2]。光电系统作为一种光电探测设备,具有能成像、细节分辨率能力强的优势^[3];光电系统属于无源探测设备,本身不辐射能量,通过接收目标辐射热能进行目标探测和定位,因而具有很大的隐蔽性,不易被侦察和定位,具有较强的抗有源电子干扰能力^[4]。但缺点是受气象条件约束,易受海杂波干扰,无法全天候工作^[5]。两者组合成的探测系统能发挥各自优点,互为补足。光电跟踪系统利用雷达系统的引导信息实现

对目标的搜索、定位及跟踪^[6]。舰载光电设备受船摇扰动(横摇、纵摇、艏摇)的影响,使视轴晃动,造成图像模糊,甚至丢失目标^[7]。为快速并准确搜索、定位及跟踪目标,减小光电设备在跟踪瞄准时船摇带来的扰动误差,需选择合适的视轴稳定策略。

目前实现视轴稳定的方法从原理上讲有两种:一种是构建机械稳定平台,通过反方向的运动来克服舰船的摇摆,该方法结构复杂,精度低^[8,9]。另外一种就是利用伺服稳定控制技术将设备直接安装在甲板上,通过敏感元件获取舰船运动的信息,将目标运动和载体运动进行综合解算,借助旋转矩阵把由载体运动导致的方位角和俯仰角的变化经坐标变换来修正视轴的指向^[10]。该方法结构简单且提高了视轴的控制精度。

第二种方法-基于旋转矩阵的轴角补偿算法适用于已知目标在地理坐标系下的方位及俯仰信息的船摇扰动补偿^[11]。当舰载光电设备工作在特殊工况下,例如方位轴摆

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(12103052)

收稿日期: 2021-09-09 修回日期: 2021-10-24

扫、俯仰轴定位即已知目标在甲板系下的方位信息和地理系下的俯仰信息时,该补偿算法不再适用。

针对特殊工况下的视轴稳定问题,本文改进了基于旋转矩阵的轴角补偿算法:通过参考坐标系的变换,首先推导出舰载光电设备的方位轴摆扫、俯仰轴定位这一特殊工况下视轴稳定的关系式,其次建立了光电设备在不同的工况下跟踪目标时视轴稳定的数学模型。最后在 MATLAB/simulink 上进行仿真。改进的补偿算法可解决舰载光电设备在特殊工况下视轴稳定的问题。

2 坐标系定义及坐标系变换

为了对船摇扰动进行补偿或校正,首先定义几种坐标系,根据地理坐标系与甲板坐标系之间的变换关系,建立起地理坐标系下的方位角 A_D 、俯仰角 E_D 与甲板坐标系下的方位角 A_C 、俯仰角 E_C 之间转换的数学模型^[12]。

2.1 坐标系及船摇参量定义

地理坐标系:

地理坐标系为 $O_X_D Y_D Z_D$ 。以惯导中心为原点 O , O_Y_D 轴指向正北, O_X_D 轴指向正东, O_Z_D 轴指向天顶成右手系。

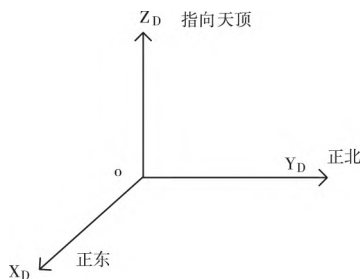


图1 地理坐标系

甲板坐标系:

甲板坐标系为 $O_X_C Y_C Z_C$ 。以惯导中心为原点 O , O_Y_C 轴指向舰船的艏艉线,艏艉为正; O_Z_C 轴垂直甲板面,向上为正; O_X_C 轴与 O_Z_C 轴及 O_Y_C 轴成右手系。

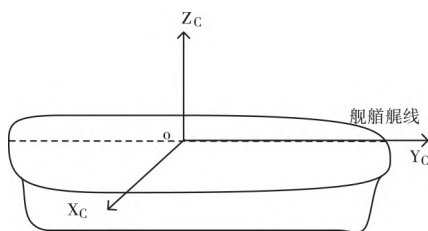


图2 甲板坐标系

方位框架坐标系:

方位框架坐标系为 $O_X_a Y_a Z_a$ 。以光学设备中心为原点 O , O_Z_a 轴与 O_Z_C 轴重合,垂直于甲板面向上为正; O_X_a 轴与俯仰轴重合,设备右侧方向为正; O_Y_a 轴与 O_Z_a 轴及 O_X_a

X_a 成右手系。

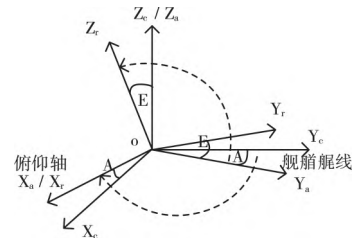


图3 设备坐标系

俯仰框架坐标系:

俯仰框架坐标系为 $O_X_r Y_r Z_r$ 。以光学设备中心为原点 O , O_Y_r 轴指向光电设备的视轴,视轴朝前为正; O_X_r 轴与俯仰轴重合,设备右侧方向为正; O_Z_r 轴与 O_Y_r 轴及 O_X_r 成右手系。

船摇参数定义如下图:

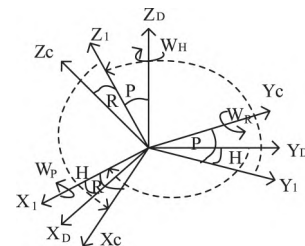


图4 船摇参数定义图示

横倾角 R 是舰体绕艏艉线相对水平面的转角,右舷下降为正;纵倾角 P 是舰艏艉线相对水平面的转角,舰艏抬高为正;艏向角 H 是舰艏艉线在水平面的投影与正北的夹角,顺时针方向为正。

2.2 地理坐标系与甲板坐标系的转换

将目标的地理极坐标位置(设目标信息为:距离舰艇 D 、地理方位角 A_D 、地理俯仰角 E_D ^[12])变换为地理系下直角坐标。

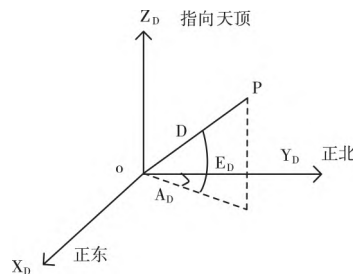


图5 地理坐标系中目标位置

$$\begin{aligned} X_d &= D * \cos(E_D) * \sin(A_D) \\ Y_d &= D * \cos(E_D) * \cos(A_D) \\ Z_d &= D * \sin(E_D) \end{aligned} \quad (1)$$

地理系直角坐标到甲板系直角坐标的转换:

采用先船摇再纵摇后横摇的旋转次序建立 3 个子变换矩阵,即分别只转过 H 、 P 、 R 角度,得到相应的船向变换阵 T_H 、纵倾变换阵 T_P 、横倾变换阵 T_R ,再用矩阵乘积运算综

合 3 个船摇状态^[13]:

$$(X_C Y_C Z_C)^T = T_R T_P T_H (X_D Y_D Z_D)^T$$

展开得到船摇位置矩阵变换公式

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos R & 0 & -\sin R \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R & 0 & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos P & \sin P \\ 0 & -\sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H & -\sin H & 0 \\ \sin H & \cos H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} \quad (2)$$

计算目标在甲板系下的方位角和俯仰角

$$A_C = \tan^{-1}(X_C/Y_C)$$

$$E_C = \sin^{-1}(Z_C/D)$$

将式(1)、(2)带入上式可得到坐标变换公式

$$A_C = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(E_D) [\cos(R) \sin(A_D - H) + \sin(R) \sin(P) \cos(A_D - H)] - \sin(E_D) \sin(R) \cos(P)}{\cos(E_D) \cos(P) \cos(A_D - H) + \sin(E_D) \sin(P)}\right) \quad (3)$$

$$E_C = \sin^{-1}\{\cos(E_D) [\sin(R) \sin(A_D - H) - \cos(R) \sin(P) \cos(A_D - H)] + \sin(E_D) \cos(R) \cos(P)\} \quad (4)$$

同理可得坐标反变换公式

$$A_D = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(R) \sin(E_C) + \cos(R) \cos(E_C) \sin(A_C)}{\cos(P) \cos(E_C) \cos(A_C) + \sin(P) \sin(R) \cos(E_C) \sin(A_C) - \cos(R) \sin(P) \sin(E_C)} + H\right) \quad (5)$$

$$E_D = \sin^{-1}(\cos(E_C) (\sin(P) \cos(A_C) - \cos(P) \sin(R) \sin(A_C)) + \cos(R) \cos(P) \sin(E_C)) \quad (6)$$

3 视轴稳定算法原理

3.1 摆扫视轴稳定数学模型推导

光电跟踪器在摆扫时可等效为跟踪甲板系下方位角度为 $A_0(t)$ 、地理系下俯仰角度为 E_D 的动目标。该目标在甲板系下的方位速度变化如图 6 所示。

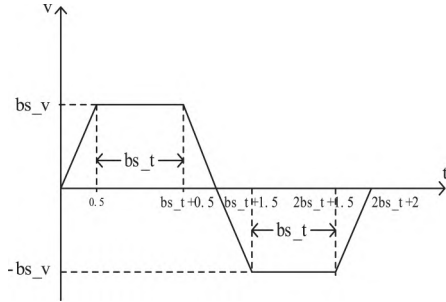


图 6 摆扫时方位轴运动速度曲线

(bs_v 为摆扫最大速度 bs_t 为以 bs_v 运动的时间)

根据上图速度曲线,可确定方位速度回路的输入量,保证方位轴在甲板系下完成摆扫运动。船摇的影响会导致俯仰轴角位置在地理系下发生变化,为保证俯仰角度为常值,所以对船摇扰动对俯仰轴的影响进行实时补偿。

初始时刻方位框架坐标系运动,俯仰框架坐标系与其固连,此时甲板系下方位框架角度为 $A_0(t)$,俯仰角 $E_0 = 0^\circ$ 。为保证俯仰角度在地理系下为常值,需将目标在地理系下的俯仰角和方位角带入式(4)中,可求出俯仰轴在甲板系下的角度控制量。俯仰角度为已知常值,由于方位角度未知,需要对其进行求解。

已知目标在甲板系下方位角度及俯仰角度求其在地理系下方位角度,可通过式(5)求出。将 $A_0(t)$ 、 $E_0 = 0^\circ$ 带入得到

$$A_D(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(R) \sin(A_0(t))}{\cos(P) \cos(A_0(t)) + \sin(P) \sin(R) \sin(A_0(t))} + H\right)$$

将 $A_D(t)$ 及 E_D 带入角位置变换式(3)及(4)中解算出 $A_C(t)$ 及 $E_C(t)$ 。

$$A_C(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(E_D) [\cos(R) \sin(A_D(t) - H) + \sin(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)] - \sin(E_D) \sin(R) \cos(P)}{\cos(E_D) \cos(P) \cos(A_D(t) - H) + \sin(E_D) \sin(P)}\right)$$

$$E_C(t) = \sin^{-1}\{\cos(E_D) [\sin(R) \sin(A_D(t) - H) - \cos(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)] + \sin(E_D) \cos(R) \cos(P)\}$$

$E_C(t)$ 为俯仰伺服系统控制量。以 $E_C(t)$ 为俯仰伺服系统输入量,即可保证俯仰角度在地理系下为常值。

3.2 动目标数引跟踪视轴稳定算法原理

已知目标不同位置引导信息,光电跟踪设备进行数引跟

踪时,可分为以下 4 种情况来考虑:

1) 已知目标在地理系下的坐标为 $(A_D(t), E_D(t))$ 。

直接按正变换求解出 $A_C(t)$ 、 $E_C(t)$ 。将 $A_D(t)$ 及 $E_D(t)$

带入(3)、(4)式中得

$$A_C(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(E_D(t)) [\cos(R) \sin(A_D(t) - H) + \sin(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)] - \sin(E_D(t)) \sin(R) \cos(P)}{\cos(E_D(t)) \cos(P) \cos(A_D(t) - H) + \sin(E_D(t)) \sin(P)}\right)$$

$$E_C(t) = \sin^{-1}\{\cos(E_D(t)) [\sin(R) \sin(A_D(t) - H) - \cos(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)] + \sin(E_D(t)) \cos(R) \cos(P)\}$$

将 $A_C(t)$ 、 $E_C(t)$ 作为方位与俯仰位置回路输入量。

时,直接将 $A_C(t)$ 、 $E_C(t)$ 作为方位与俯仰位置回路输入量。

2) 已知目标在甲板系下的位置信息为 $(A_C(t), E_C(t))$

3) 已知目标在地理系下的俯仰信息为 $E_D(t)$,甲板系下

的方位信息为 $A_c(t)$ 。

由于方位轴摆扫模式是该类的一个特例,该类分析过程

与摆扫模式的分析过程一致,这里就不再赘述。将 $A_c(t)$ 及

$E_c = 0^\circ$ 带入反变换式(5)中得

$$A_D(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(R) \sin(A_c(t))}{\cos(P) \cos(A_c(t)) + \sin(P) \sin(R) \sin(A_c(t))} + H \right)$$

将 $A_D(t)$ 及 $E_D(t)$ 带入正变换式(3)(4)中得

$$A_c(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(E_D(t)) [\cos(R) \sin(A_D(t) - H) + \sin(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)] - \sin(E_D(t)) \sin(R) \cos(P)}{\cos(E_D(t)) \cos(P) \cos(A_D(t) - H) + \sin(E_D(t)) \sin(P)} \right)$$

$$E_c(t) = \sin^{-1} \{ \cos(E_D(t)) [\sin(R) \sin(A_D(t) - H) - \cos(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)] + \sin(E_D(t)) \cos(R) \cos(P) \}$$

4) 已知目标在甲板系下的俯仰信息为 $E_c(t)$ 地理系下

将 $A_D(t)$ 及 $E_D = 0^\circ$ 带入正变换式(3)中得

的方位信息为 $A_D(t)$ 。

$$A_c(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(R) \sin(A_D(t) - H) + \sin(R) \sin(P) \cos(A_D(t) - H)}{\cos(P) \cos(A_D(t) - H)} \right)$$

将 $A_c(t)$ 、 $E_c(t)$ 作为方位与俯仰位置回路输入量。动目标的数引信息按以上类别划分后,采用相应的视轴稳定策略,光电系统可实现对动目标的稳定跟踪。

地理坐标系反变换模块。船摇参数及给定量如表 1 所示。

表 1 船摇及给定量参数表

参数名	参数值
艏摇 H	0.3sin(1.2t) rad/s
纵摇 P	0.12sin(0.785t) rad/s
横摇 R	0.35sin(0.628t) rad/s
方位摆扫周期 T	10s(初始值)
方位摆扫速度 V	20°/s(初始值)
俯仰角度给定	1°(初始值)

4 仿真研究

4.1 摆扫视轴稳定算法仿真验证

在 MATLAB/simulink 中搭建模型,对摆扫视轴稳定算法进行仿真验证,该模型简化处理,省略了控制器及被控对象模型。仿真模型共包括惯导模拟发生模块、方位位置发生模块、地理坐标系到甲板坐标系正变换模块以及甲板坐标系到

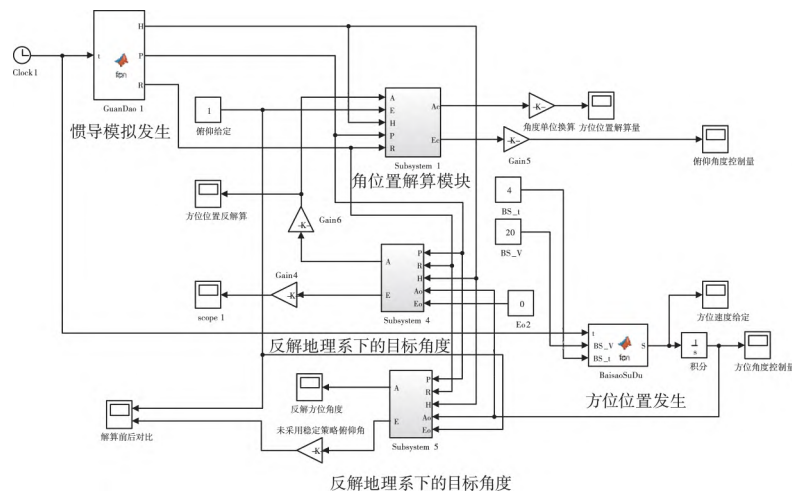


图 7 摆扫视轴稳定仿真图

仿真结果如下所示。

图 8 至图 11 表明,舰船摇摆对俯仰位置的干扰作用是非常明显的。在船摇作用下,地理系下俯仰角的数据特性发生了明显地变化,本应平滑的曲线变得带有类似船摇数据的周期性起伏,在观测时间内幅值在 20°左右波动,其幅值波动与方位轴摆扫周期及摆扫速度相关。采用稳定策略后,将 $E_c(t)$ 作为俯仰伺服系统输入量能补偿船摇扰动对光电跟踪系统的影响。由于以上仿真是在理想情况下,忽略了惯导数据

误差以及光电设备编码器的测量误差,实际工程中不能做到对船摇位置干扰的全补偿。在原有仿真模型基础上,再搭建一组系统并引入误差,比较引入前后 $E_c(t)$ 的变化。工程中可认为船体姿态与仪器方位及俯仰角的测量误差为高斯噪声^[13],所以在新系统中加入均值为 0,方差为 0.04 的高斯噪声。

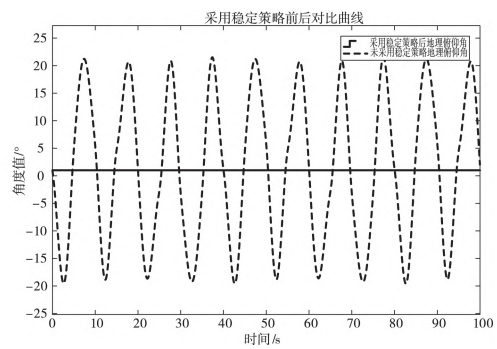
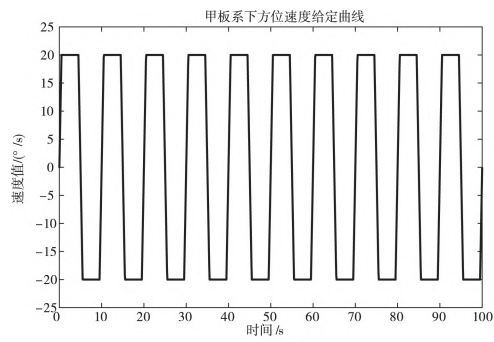


图8 摆扫周期 10s、摆扫速度 $20^{\circ}/s$ 给定及稳定效果曲线图

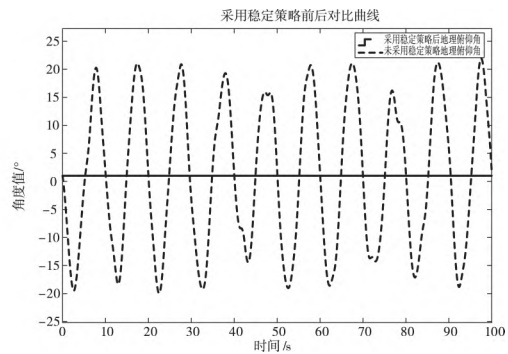
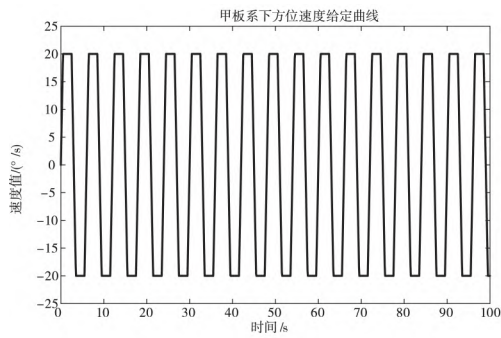


图9 摆扫周期 6s、摆扫速度 $20^{\circ}/s$ 给定及稳定效果曲线图

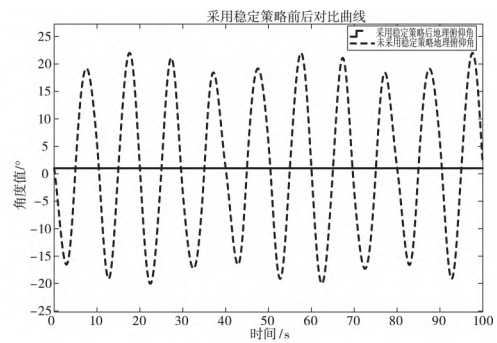
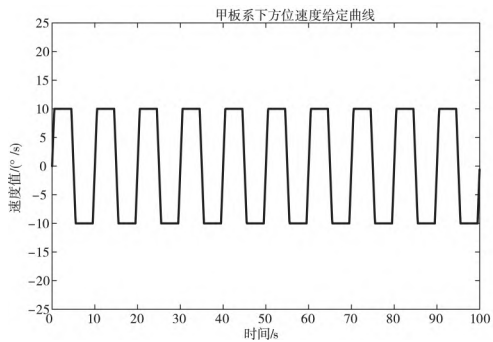


图10 摆扫周期 10s、摆扫速度 $10^{\circ}/s$ 给定及稳定效果曲线图

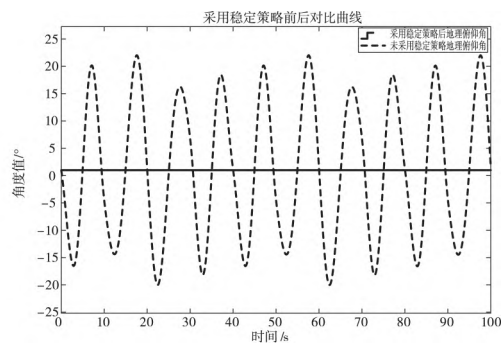
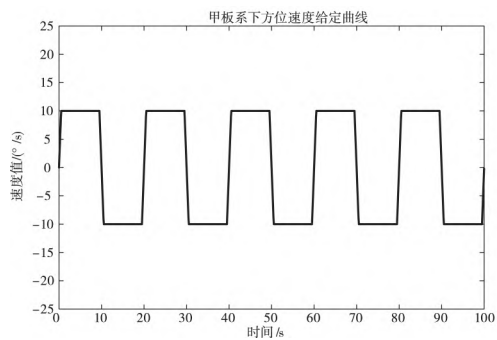


图11 摆扫周期 20s、摆扫速度 $10^{\circ}/s$ 给定及稳定效果曲线图

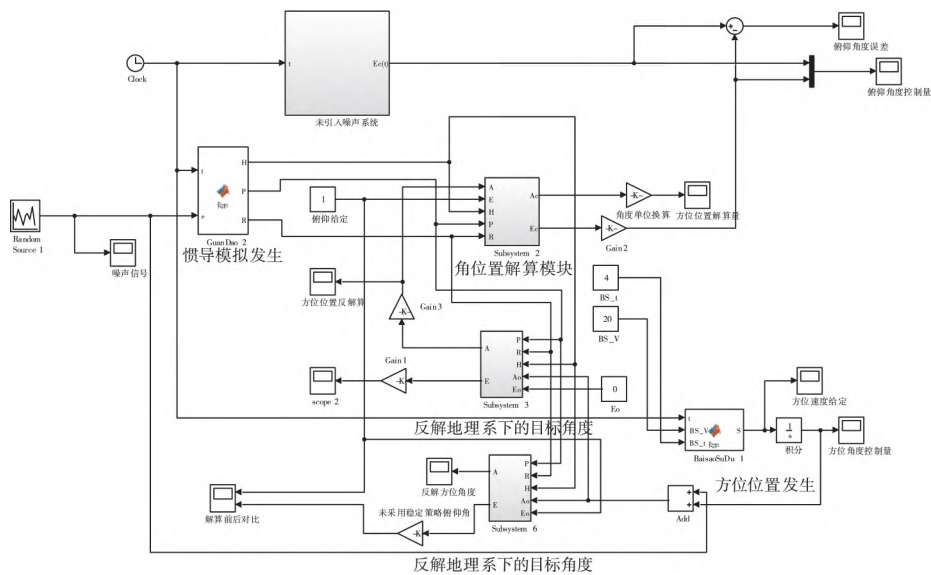


图 12 摆扫视轴稳定系统引入噪声对比仿真图

仿真结果如下图所示。

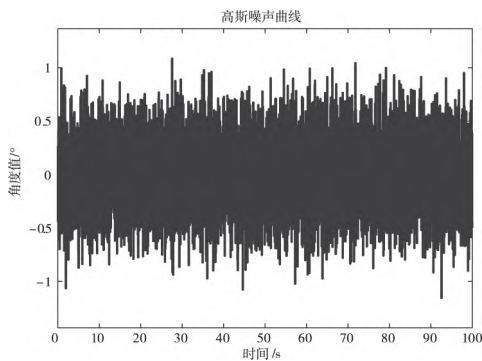


图 13 引入噪声曲线

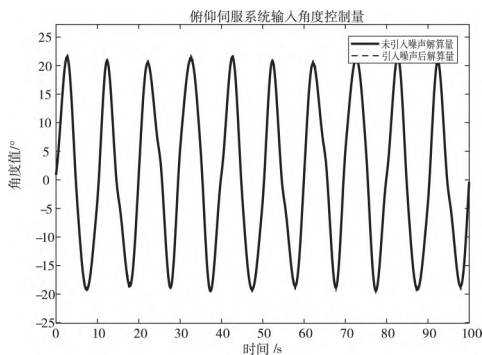


图 14 引入噪声前后俯仰解算量对比曲线

从图 13 至图 15 可以看出, 俯仰解算量曲线呈类似正弦周期性变化, 引入噪声前后解算的俯仰角度误差在俯仰解算量曲线的波峰和波谷处最大、在过零点处最小。原本引入的高斯噪声, 传递到俯仰角时, 已经不再是高斯噪声, 与船体姿

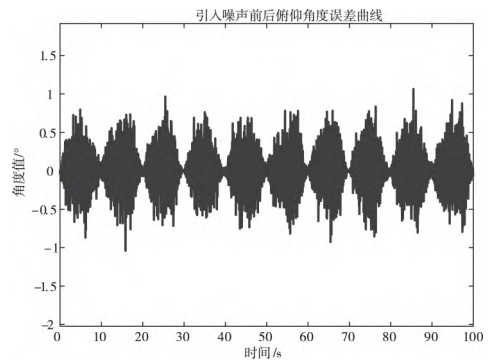


图 15 噪声方差为 0.04 的俯仰角度误差曲线

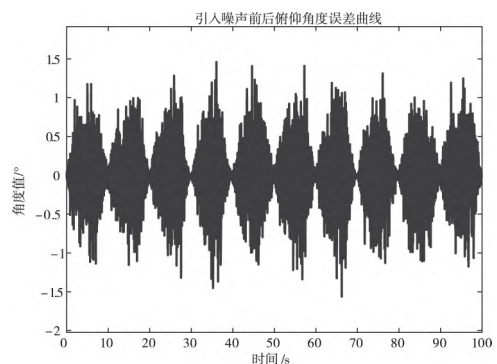


图 16 噪声方差为 0.09 的俯仰角度误差曲线

态和仪器方位与俯仰位置有着严重的耦合。从图 15 与图 16 中可以看出, 对应噪声方差 0.04 的误差曲线在 -1° 与 1° 之间波动, 对应噪声方差 0.09 的误差曲线在 -1.5° 与 1.5° 之间波动。表明俯仰角度误差的波动幅度与引入的高斯噪声方差大小有关, 即船体姿态与仪器方位及俯仰角的测量误差影响

伺服系统控制器的输入, 这为惯导及编码器的选型提供参考依据。

4.2 动目标数引跟踪仿真验证

以第三类数引信息即已知目标在地理系下的俯仰信息

为 $E_D(t)$, 甲板系下的方位信息为 $A_C(t)$ 为例进行仿真验证。利用 MATLAB/simulink 搭建模型, 该模型简化处理, 省略了控制器及被控对象模型。船摇参数与表一一致。

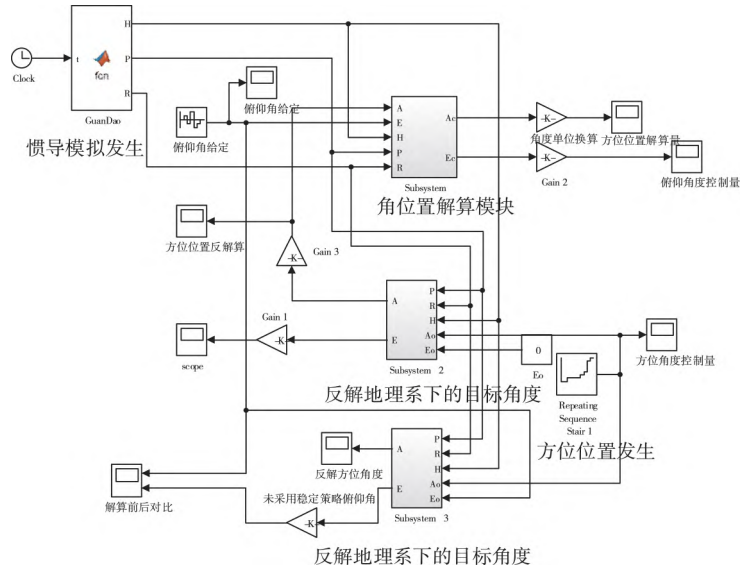


图 17 动目标跟踪视轴稳定仿真图

仿真结果如下所示:

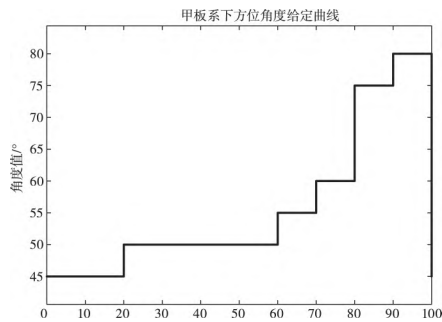


图 18 目标在甲板系下的方位位置曲线

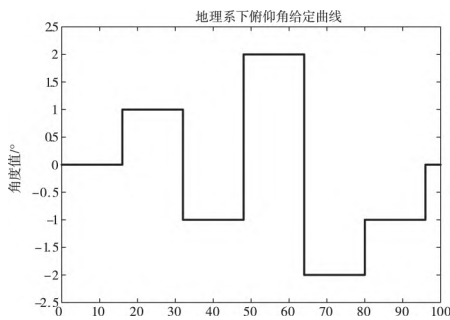


图 19 目标在地理系下的俯仰位置曲线

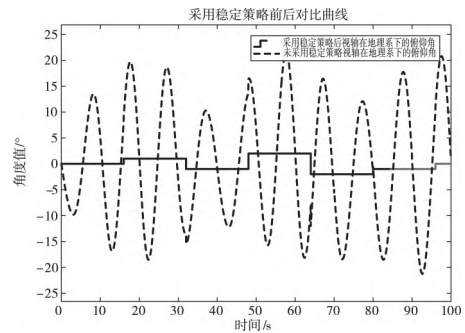


图 20 采用稳定策略与未采用稳定策略效果对比图

稳定策略后, 将 $E_C(t)$ 作为俯仰伺服系统输入量能补偿船摇扰动对光电跟踪系统的影响。

5 总结

本文针对舰载光电跟踪设备在特殊工况下的视轴不稳定问题, 改进了基于旋转矩阵的轴角补偿算法。经过仿真得出以下结论。

- 1) 针对舰载光电设备方位轴摆扫、俯仰轴定位这一特殊工况, 所改进的算法是有效的。在五级海况下, 补偿前光电设备在地理系下俯仰角的幅值在 20° 左右周期性波动, 经改进算法补偿后光电设备俯仰角稳定在地理系下给定值 1° 。

(下转第 105 页)

图 20 表明, 在船摇作用下, 目标在地理系下的俯仰角发生了明显地变化, 在观测时间内摆动幅值约为 21.06° 。采用

- [4] Nishimura J, Matsuzaka Y, Izutsu N, et al. A new packing launching method for balloons made of thin polyethylene films [C]. Cospar Scientific Assembly. 34th COSPAR Scientific Assembly 2002.
- [5] 顾逸东, 姜鲁华, 徐志衡, 等. 中国科学院高空气球系统改造工程 [C]. 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十次学术会议论文集, 中国空间科学学会空间探测专业委员会: 中国空间科学学会空间探测专业委员会, 1997: 4.
- [6] Fuke H, Iijima I, Izutsu N, et al. Balloon Launch and Flight Operation from the Research Vessel Hakuho Maru for Stratospheric Air Sampling over the Eastern Pacific Equator [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2014, 31(7): 1540-1548.
- [7] Williams P, Sgarioni D, Trivailo P. Optimal control of an aircraft-towed flexible cable system [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics: A Publication of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Devoted to the Technology of Dynamics and Control 2006, 29(2): 401-410.
- [8] 郭良, 唐乾刚, 张青斌. 飞艇系留试验中的绳索动力学研究 [C].

第九届全国振动理论及应用学术会议论文集, 中国力学学会、中国振动工程学会、中国航空学会、中国机械工程学会、中国宇航学会: 中国力学学会, 2007: 8.

- [9] 周炜, 易建军, 郑建荣. ADAMS 软件中绳索类物体的一种建模方法 [J]. 现代制造工程, 2004(5): 38-39.
- [10] CAD/CAM/CAE 技术联盟. Adams 动力学分析与仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 93-94.



[作者简介]

李艳博 (1997 年 10 月-) ,男 (汉族) ,河北人 ,硕士研究生 ,主要研究领域为飞行器设计。

张泰华 (1982 年 10 月-) ,男 (汉族) ,甘肃人 ,博士 ,正高级工程师 ,主要研究领域为浮空器结构设计及发放技术。

张冬辉 (1986 年 11 月-) ,男 (汉族) ,河北人 ,博士 ,高级工程师 ,主要研究领域为新型浮空器技术与高空气球发放技术。

王梓皓 (1992 年 10 月-) ,男 (汉族) ,山东人 ,硕士 ,工程师 ,主要研究领域为固体力学。

(上接第 14 页)

2) 经改进算法解算后的俯仰角度控制量的数据特性与方位轴摆扫周期、摆扫速度以及传感器测量噪声相关。引入噪声前后,解算的俯仰角度误差曲线波动的幅值与高斯噪声的方差相关,为惯导及编码器的选型提供了参考依据。

3) 针对舰载光电设备在目标数引信息引导下跟踪动目标问题,将数引信息分为 4 类,以第三类即已知目标在地理系下的俯仰信息,甲板系下的方位信息为例,证明了改进算法的通用性。在五级海况下,补偿前光电设备在地理系下俯仰角的幅值波动约为 21.06° 。经改进算法补偿后光电设备俯仰角稳定在地理系下给定曲线。

参考文献:

- [1] 朱健楠, 虞梦琴, 杨益新. 无人水面艇感知技术发展综述 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1486-1492.
- [2] 李先艳. 一种应用于海防监控领域中的雷达与光电协同工作方法研究 [J]. 光学与光电技术, 2020, 18(5): 28-33.
- [3] 李海波, 刘巍. 面向岸基应用的光电复合监控体制分析 [J]. 光学与光电技术, 2017, 15(4): 83-89.
- [4] 皇甫一江. 基于舰载雷达红外跟踪传感器的作战使用及抗干扰方法 [J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(6): 59-61, 66.
- [5] 戴春华. 一种跟踪掠海飞行小目标的雷达光电融合处理方法 [J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(2): 56-59.
- [6] 李珂, 李醒飞, 杨帆. IMM-UKF 算法在两坐标雷达-光电融合跟踪系统中的改进与应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 250-259.
- [7] 张建强. 舰载激光通信视轴稳定控制技术 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [8] 张恩东, 李焱, 张玉东, 董宇星, 李毅. 速度前馈补偿的舰载光电设备伺服系统的设计 [J]. 电光与控制, 2016, 23(7): 59-63.

[9] 张兴国, 韩涛, 李靖. 舰载环境下光电经纬仪的引导与实现 [J]. 光电工程, 2017, 44(5): 511-515, 559.

[10] Yao Z Q, Zhu H J, Du W H. Design and Implementation of Automated Warehouse Monitoring System Based on the Internet of Things [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 543-547: 1099-1102.

[11] Guoyou L I, Chengyu F U, Peilong H E, et al. The Method of Miss Distance Measurement Based on Coordinate Operation of Radar and Photoelectric Theodolite [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014.

[12] 王玉, 刘宗凯, 周本谋. 舰载光电跟踪扰动模型的建立与前馈补偿 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(6): 6-12.

[13] 马洪涛. 舰载光电跟踪伺服控制系统建模及稳定性研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(14): 121-123.

[14] 赵鸿宇, 扈宏杰. 舰载自稳定光电平台控制系统研究 [J]. 电光与控制, 2017, 24(6): 65-68.



[作者简介]

谢航 (1996.10-) ,男 (汉族) ,黑龙江省富锦市人 ,硕士研究生 ,主要从事自动控制方面的研究工作。

杨维帆 (1987.08-) ,男 (汉族) ,黑龙江省大庆市人 ,博士研究生 ,主要从事空间光学传感器稳像控制方面的研究工作。

李德全 (1991.11-) ,男 (汉族) ,辽宁省海城市人 ,博士研究生 ,主要从事精密仪器方面的研究工作。

王栋 (1979.10-) ,男 (汉族) ,山西省阳泉市人 ,博士研究生 ,硕士研究生导师 ,副主任 ,研究员 ,主要从事精密仪器方面的研究工作。