

舰载遥测与红外电视跟踪一体化设计与实现

李海鹏, 黎刚果, 吕瑶

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对遥测近海面测量时面临的复杂场景干扰以及视觉观感不强等方面的问题, 提出在舰载遥测系统上加装红外跟踪系统。采用口径 140 mm、焦距 260 mm/520 mm 的光学系统, 能对红外源目标进行跟踪、图像记录和本地/远程实时监控等功能。提出的 Kalman 滤波估计算法, 能够准确预测目标的速度, 使得速度反馈技术在设备中成功实现。介绍了舰载遥测系统的特点以及一体化设计思想, 实现了对遥测系统远、近场电轴的标校以及遥测与红外的互跟踪, 并通过实例验证了设计的可行性。

关键词: 舰载遥测; 红外电视; 一体化; 遥测/红外跟踪

Integrated Design and Implementation of Shipborne telemetry and infrared TV tracking

Li Haipeng, Li Gangguo, Lü Yao

(The Unit 92941 of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: The design of infrared TV tracking equipment installation on shipborne telemetry system is proposed to solve the weak visual image problem and the near sea surface measure problem of the telemetry system when face the complicated background interference. Firstly, the feature of shipborne telemetry system and the integrated design are introduced, which realize the telemetry system calibration in near and far field, and switch freely between telemetry and infrared tracking. The infrared TV tracking equipment adopts the optics system with 140 mm caliber, 260 mm/520 mm focus, which can track the infrared object, record image and be monitored. Then the Kalman filter arithmetic is designed to predict the object speed accurately, which successfully fulfills the speed forward feed technique on the equipment. Finally the design feasibility is validated by experiments.

Keywords: shipborne telemetry; infrared TV; integration; telemetry/infrared tracking

0 引言

舰载遥测系统以其海上机动性能以及远海布站的优势, 在海上靶场远距离飞行目标的测控保障中, 发挥着不可替代的作用。但是, 舰载遥测系统也有弱点, 在近距离、低仰角跟踪捕获目标时, 接收的无线电信号易被海面反射造成干扰, 进而影响对目标的稳定跟踪。而红外跟踪系统具有的自动捕获跟踪功能, 能弥补遥测在近海面工作的不足, 实现对运动目标的自动检测、捕获与跟踪, 完成复杂海面场景至天空背景下目标的稳定跟踪, 从而实现遥测系统和光电成像系统的优势互补和稳定高精度跟踪测量, 极大提高了遥测系统获取数据概率。简单的说, 舰载遥测和光学跟踪设备的集成有利于实现资源共享, 功能互补, 能有效提高舰载遥测系统近距离和低仰角跟踪的综合性能^[1]。同时, 对于没有遥测合作设备的目标或飞行器, 红外跟踪系统也可独立实现跟踪测量, 这是传统的遥测所不具备的能力。

1 红外电视系统设计

红外电视系统主要包括光学镜头设备和管理计算机。

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-18。

作者简介: 李海鹏(1979-), 男, 吉林农安县人, 工程师, 主要从事遥测遥控技术方向的研究。

光学镜头设备安装在遥测系统主天线俯仰臂上, 主天线结构设计之初就考虑光轴、电轴及标校轴的一致性, 便于红外设备的安装及标校。管理计算机安装在遥测终端设备机柜中, 通过遥测伺服控制单元实现对主天线的驱动控制。系统组成原理如图 1 所示。

1.1 主要功能

1.1.1 目标跟踪功能

能够自动捕获、跟踪目标; 实时输出跟踪目标的图像, 供监视、显示使用; 实时记录视频图像; 自动捕获跟踪目标, 将脱靶量信息实时输出给遥测伺服系统, 驱动天线锁定跟踪目标; 实时跟踪目标时, 可以方便实现红外电视跟踪与遥测跟踪间的相互切换, 共同完成目标跟踪。

1.1.2 标校功能

字符显示功能; 时间码解调功能; 游标移动功能; 十字丝显示功能; 串口收发数据功能。

1.2 光学镜头设备

光学镜头由红外光学系统(两档定焦望远镜)、头部控制小系统、红外探测器和高速图像处理系统四部分组成。三维图如图 2 所示。

1.2.1 红外光学系统

1.2.1.1 系统参数设计

光学系统参数的确定, 主要考虑如下几点因素, 第一探测能力即作用距离, 第二是捕获跟踪目标的视场要和遥

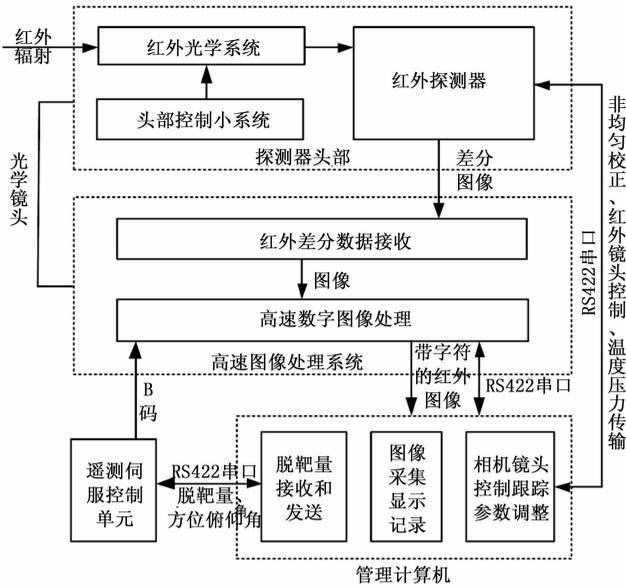


图 1 红外电视系统组成原理图

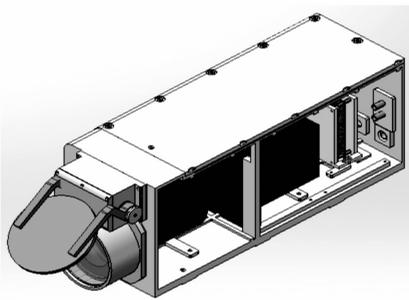


图 2 光学镜头箱体剖面图

测的跟踪误差相匹配，第三是跟踪精度即实时的测量精度，既要满足跟踪稳定性又要满足标校精度的要求。

对于探测能力，由于测量的目标离海面距离很近，受大气衰减等影响，同时考虑光学镜头的体积、重量及对遥测天线的影响等因素，选择了光学系统口径 $D \geq 140$ mm 的尺寸，在保证探测能力的同时也获得较小的体积重量。

关于捕获跟踪目标的视场和遥测的跟踪误差相匹配，前期的外引导误差较大，一般达到 $20'$ ，探测视场为引导误差的 3 倍才能保证目标在视场中，则探测视场在 1° 左右，光学系统参数考虑如下：

- 1) 光学系统口径 $D \geq 140$ mm；
- 2) 光学系统焦距 $f = 260$ mm/520 mm 两档，电控变倍；
- 3) 视场：宽视场 $1.8^\circ \times 1.4^\circ$ ；窄视场 $0.9^\circ \times 0.7^\circ$ ；
- 4) 温度调焦：电控温度调焦；
- 5) 电控变倍时间： ≤ 2.5 s。

1.2.1.2 光学系统像质评价

1.2.1.2.1 窄视场时 ($f = 520$ mm)：

- 1) 弥散斑半径 $< 8.2 \mu\text{m}$ ；
- 2) $\text{MTF} > 55\% @ 171$ p/mm；

- 3) 全视场 $> 75\%$ 的能量集中在半径 $15 \mu\text{m}$ 的圆内；
- 4) 最大畸变 $< 2\%$ ；
- 5) 全视场相对照度 $> 84\%$ 。

1.2.1.2.2 宽视场时 ($f = 260$ mm)：

- 1) 弥散斑半径 $< 8 \mu\text{m}$ ；
- 2) $\text{MTF} > 55\% @ 171$ p/mm；
- 3) 全视场 $> 75\%$ 的能量集中在半径 $15 \mu\text{m}$ 的圆内；
- 4) 最大畸变 $< 2\%$ ；
- 5) 全视场相对照度 $> 84\%$ 。

1.2.2 红外探测器

- 1) 探测器：采用进口优质 IRCCD，工作波段 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ，器件材料 HgCdTe，像素分辨率 320×256 ，像元尺寸 $30 \times 30 \mu\text{m}$ ，探测最小温差 ≤ 30 mk；
- 2) 积分时间设置：可手动调节探测器积分时间；
- 3) 工作帧频：100 Hz 或 50 Hz 可调；
- 4) 可输出标准模拟视频信号。

1.2.3 高速图像处理系统

为实现目标快速捕获和对多种类型目标的自动跟踪，采用高速 DSP 和大规模可编程逻辑阵列 FPGA 的全数字高速图像处理系统。主要实现以下功能：

1) 快速自动捕获目标功能。

设备加电后，处理系统自动进入搜索状态开始搜索目标，充分利用 FPGA 的高速并行功能，DSP 对图像数据进行全视场实时处理，一旦目标进入探测器视场设备将快速自动捕获目标，送出目标的脱靶量数据。

2) 自动跟踪功能。

对多种类型目标，DSP 程序设计和调用不同的跟踪处理算法，实现对多种类型目标自动跟踪功能。输出有效目标偏离视场中心的偏差量到遥测系统，通过遥测系统选择该误差量作为跟踪误差，完成对目标的稳定跟踪。便于遥测系统在实时跟踪目标时方便实现红外跟踪与遥测跟踪间的相互切换，共同完成对目标的跟踪。

3) 红外数字图像增强功能。

为提高系统对红外弱目标的探测能力，高速图像处理系统对红外数字图像进行增强处理。

4) 处理后的图像显示功能。

将处理后的图像叠加字符后经过 DA 转换成标准视频图像送到机下显示，以实时输出跟踪目标的直观图像。视场中心的十字丝可显示或隐藏。

1.2.4 机械系统

机械系统除耐环境设计外，为了保证方便使用，采用手动和自动一体的开闭盖设计，即可以用手扳动保护盖，也可以自动控制开关镜头的保护盖。同时，光学望远镜中加装了温度和压力传感器，可以将望远镜箱体内的温度和压力送给管理计算机，能更清楚了解镜头内的各种情况，便于故障诊断。

1.3 管理计算机

管理计算机基于 CPCI 总线结构，包括图像数据接收

板、高速数字 DSP 处理板以及图像处理软件。

1.3.1 图像数据接收板

负责接收图像处理系统下传的图像及脱靶量数据, 和 DSP 处理板通过插针栈接在一起, 体积小、功耗低, 可靠性高。将图像处理系统放置于红外光学镜头内, 将减少下传数据电缆线, 只需采用 RS422 方式即可将脱靶量数据下传, 这样使系统更加简洁、可靠。硬件平台结构如图 3 所示。

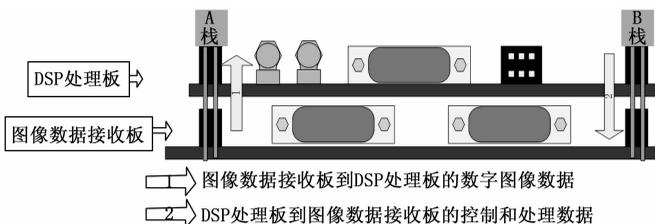


图 3 硬件平台结构图

1.3.2 DSP 处理板

采用高性能的 DSP 和大规模可编程逻辑阵列 FPGA 相结合, 将大量的流水线的耗时运算和多重并行运算放在 FPGA 中实现, 充分利用 FPGA 和 DSP 紧耦合结构共同完成信号处理及智能决策^[2]。处理板原理图如图 4 所示。

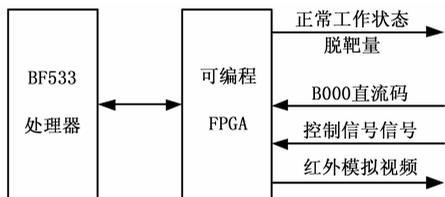


图 4 DSP 处理板原理框图

DSP 处理板首先接收控制信号, 解析出游标上、下、左、右移动控制时的中心角度偏差值, 然后接收图像数据接收板送来的目标脱靶量并发送给遥测控制系统, 最后接收天线控制器的跟踪状态和实时角信息以及时间信号, 并和大十字丝、游标、字符一起叠加到实时图像中。将叠加后的图像信号通过 D/A 转换形成标准 PAL 图像在处理软件上显示。

1.3.3 图像处理软件

1) 算法的智能决策。

针对目标特性及其环境, 图像处理软件采用多结构元目标检测算法、边缘跟踪算法以及特征跟踪等多种算法^[3], 完成目标在空中、近地面以及海天背景等场景下的检测与跟踪。

目标在视场中的运动复杂多变: 由近及远, 由远及近, 有大有小, 有亮有暗, 背景有简单和复杂。因此, 在跟踪算法中要采取如下措施:

根据目标的大小对跟踪处理区域进行自适应变化, 图像处理程序中设计了两档跟踪窗大小, 以满足任务过程中目标变化的需要; 根据目标的大小, 选择应用小目标跟踪算法和扩展目标跟踪算法; 根据背景的非均匀性, 选择应

用心跟踪算法和边缘跟踪算法; 根据目标的个数以及需要跟踪目标的类型, 选择应用单目标跟踪还是多目标跟踪; 根据背景的复杂度, 选择应用基于灰度跟踪算法和基于特征跟踪算法^[4]; 在天空有云、天地背景以及海天背景等环境下, 软件具有多算法并行处理能力, 以适应多种场景下对目标的可靠提取与稳定跟踪; 根据目标的搜索和跟踪状态, 选择不同的跟踪算法。总之, 图像处理软件设计要尽量做到减少人工干预, 满足自动跟踪处理的要求。

2) 软件接口。

对高速数字图像处理系统送过来的标准视频 (叠加有字符) 图像进行软解压后实时显示、记录和存储。

通过串口对红外探测器进行非均匀校正和积分时间设置, 同时对光学镜头小系统进行调焦和变倍控制。

通过串口与高速图像处理系统进行通讯, 并对高速图像处理系统进行控制选择; 接收脱靶量, 回送控制信号; 手动、自动选择域值调节, 算法选择 (分离目标、固定目标、海面目标), 十字丝显示隐藏。

通过串口与遥测系统进行通讯, 送脱靶量给遥测, 并接收遥测的时间信息。软件界面如图 5 所示。



图 5 图像处理软件界面

2 舰载遥测原理

2.1 伺服跟踪

舰载遥测系统工作时, 天线在伺服分系统的控制下指向预定空域, 搜索目标遥测信号, 一旦发现目标, 伺服分系统会根据遥测基带产生的跟踪误差信号、或者由其它跟踪方式产生的指令信号与天线指向角信号相比较, 产生误差信号, 经过滤波变换、数字处理和放大输出, 驱动天线指向目标。舰载与陆基遥测系统最大区别在于, 系统需进行隔离船摇扰动设计^[5-6]。

执行任务时, 伺服系统首先依据局部基准分系统提供的横摇、纵摇及航向信息, 采用高精度数学解耦算法来实现天线指向的甲板角与大地角之间的转换, 驱动天线指向预定目标空域。在局部基准分系统信息不可用的情况下使用船上综合导航系统提供的横摇、纵摇及航向信息。未捕获到目标信号之前, 可以在预定目标空域进行搜索, 搜索可以是俯仰或方位单轴进行, 也可以是双轴同时进行。天线接收到目标信号后, 当接收信号的 AGC 电平、锁定信号、误差信号满足给定条件时, 天线进入自跟踪状态, 实现对目标的平稳准确跟踪。

伺服系统的天线形式是抛物面天线加宽波束平板跟踪接收天线。当目标速度较快、距离过近或抛物面天线意外丢失目标时，依靠宽波束接收天线的宽波束，在较大范围内仍可接收到目标遥测信号并跟踪。当跟踪低仰角飞行目标时，由于海面反射影响，产生多路径效应，导致跟踪目标抖动，严重时甚至丢失目标。因此，在低仰角跟踪目标时，采用平滑滤波算法及利用波束宽度限制天线仰角等措施，确保跟踪平稳。

2.1.1 采用 DSP 的天线数字控制技术

动平台下伺服系统接口众多，需要接收三路惯导数据、接收机数据、天线驱动单元上传数据、红外脱靶量数据、按键信息、推杆信息等。采用 C6000 浮点型 DSP 和 FPGA 结合，极大程度的满足伺服系统的实时性要求，便于控制装置的升级扩展^[7]，实现了对天线伺服系统的高精度控制。

2.1.2 陀螺稳定环加船摇速度补偿

陀螺稳定策略主要利用天线俯仰臂上速率陀螺敏感出天线方位俯仰速率进行闭环控制^[8]。船摇速度补偿策略，利用采集船上惯导设备的船摇速度信息进行坐标变换，得出天线伺服系统方位俯仰轴的速度环路补偿量，实现船摇速度补偿算法。采取增加船摇速度补偿算法能够有效提高天线伺服系统隔离船摇的能力^[9]，提高天线伺服系统的测量精度。

2.2 数据解调

天线捕获射频信号并进入跟踪状态，包含遥测信号及跟踪角误差信号的左、右旋信号，经低噪声放大器放大，通过高频电缆馈送到射频耦合网络，左、右旋信号分路后进入 S 频段下变频器，经混频、滤波、放大，输出 70 MHz 中频信号送至遥测基带，遥测基带在 70 MHz 中频直接采样，其后处理全部以数字信号的形式在数字域中进行，并将解调出的角误差信号送伺服系统，完成对目标的自动跟踪^[10]；载波解调后的视频信号在遥测基带中经码同步、帧同步和副帧同步器的相关处理，形成遥测数据帧，在遥测软件的管理下，完成实时、事后数据处理及数据存盘等工作。如果数据经过加密处理，则遥测基带输出的数据送解密机进行解密，解密后的数据再送回遥测基带进行解调处理^[11]。

3 遥测/红外跟踪设计

3.1 基于 Kalman 滤波的目标位置和速度预测分析

在图像处理过程中，由于面临复杂的场景，使得图像处理办法在提取目标的过程中易受到场景中背景信号的干扰，势必对定位目标在图像中的位置造成干扰，即提取的目标位置出现偏差，该有偏差的脱靶量送入跟踪控制系统中，导致对目标的跟踪晃动，带来较大的跟踪误差。因此，为提高系统的跟踪稳定性和跟踪精度，需要对图像处理的脱靶量进行滤波预测处理，以获得稳定、连续、更高精度的角度测量数据。在此基础上，进一步预测目标的运动速度，该速度可作为跟踪控制系统的速度顺馈信息参与跟踪控制，从而进一步提高稳定性和跟踪精度。

Kalman 滤波是一种能够准确预测目标位置和速度的方

法，它用状态转移法把干扰和信号看成是动力学系统的一个状态，然后用统计特性估算出它的大小，再从信号中滤除，得到信号的真值。

3.1.1 目标位置的表示

根据目标的运动轨迹特性分析，在一段时间内目标的运动轨迹可以用多项式表示，在满足预测精度的情况下，在 Kalman 滤波中，二次多项式已包含了目标的位置、速度、加速度信息，在实际应用中，此 3 种信息已可满足要求。因此，采用二次多项式来表示在一段时间内目标的运动轨迹。该系统中，测量数据有仪器的角度和脱靶量，由此可以获得设备对目标的指向测量角度，即：

$$Y_{ai} = A_i + \Delta A_i \quad (1)$$

$$Y_{ei} = E_i + \Delta E_i \quad (2)$$

其中： A_i 表示设备方位角度； E_i 表示设备俯仰角度； ΔA_i 表示方位脱靶量； ΔE_i 表示俯仰脱靶量； i 为不同时刻； Y_{ai} 表示在 i 时刻目标方位角度的测量值； Y_{ei} 表示 i 时刻目标俯仰角的测量值。

3.1.2 Kalman 滤波的数学模型

$$\bar{X} = \Phi \bar{X} \quad (3)$$

$$\bar{P} = \Phi P \Phi^T + Q \quad (4)$$

$$K = \bar{P} M^T (M \bar{P} M^T + R)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{X} = \bar{X} + K(Y - M \bar{X}) \quad (6)$$

$$P = (I - KM)P(I - KM)^T + KPK^T \quad (7)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 4e-7 & 4e-5 & 4e-3 \\ 4e-5 & 4e-3 & 0.01 \\ 4e-3 & 0.01 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0.01 & 5e-5 \\ 0 & 1 & 0.01 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中： Φ 表示状态转换矩阵； Q 表示测量噪声矩阵； M 表示测量矩阵； P 表示协方差矩阵； R 表示测量误差的方差矩阵； I 表示单位矩阵； K 表示滤波增益； \bar{X} 表示预计值； \hat{X} 表示估计值； Y 表示测量值。

将 Kalman 滤波运用于跟踪系统，对系统的跟踪性能有较大的提升^[12]。能够准确预测目标的速度，使得速度顺馈技术在设备中成功实现；提高了快速捕获和跟踪目标的能力，使跟踪更稳定，大大提高了跟踪精度，较好地解决了一般闭环控制系统普遍存在的跟踪精度和稳定性之间的矛盾。

3.2 遥测/红外跟踪

当红外电视系统捕获到红外源后，产生脱靶量信息及锁定指示，通过串口送至遥测伺服控制单元 (ACU)。在常规模式下，例如程序跟踪、自跟踪模式下，ACU 只接收上述信号，不做运算处理。当 ACU 切换至红外跟踪模式后，首先判断红外电视锁定信号是否有效，若有效，利用红外系统传送的脱靶量结合当前天线的方位、俯仰角，通过 kalman 滤波算法，估计出目标所处的方位、俯仰角，最终形成天线指向偏离目标的方位、俯仰角误差信息，进而驱动

天线运转,直至红外源目标处于红外电视的中心,实现红外电视的跟踪流程。遥测与红外跟踪切换界面如图 6 所示。

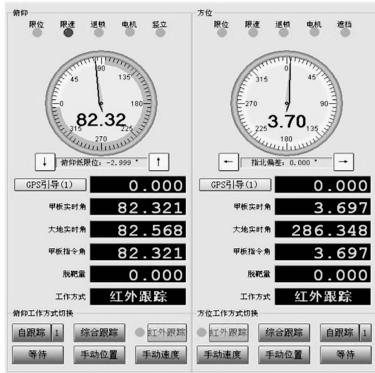


图 6 遥测/红外跟踪切换软件界面

4 工程应用

以某跟踪实例进行数据分析,图 7 (a) 给出了遥测跟踪与红外跟踪方式统计。图 7 (b) 给出了遥测跟踪与红外跟踪的角误差统计曲线,采用红外跟踪时角误差值明显优于遥测跟踪时角误差值。因此,红外电视系统与遥测系统一体化设计应用,能有效提高舰载遥测系统近距离和低仰角跟踪性能。

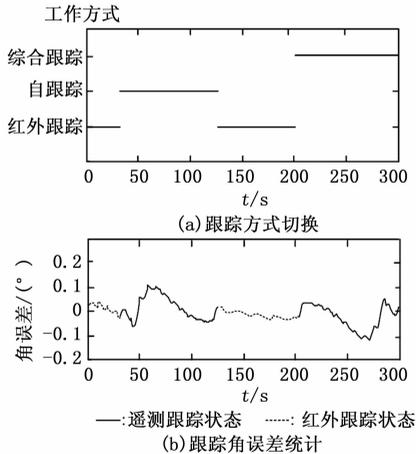


图 7 跟踪方式及跟踪角误差统计

经过近两年的实际应用,该系统无论是对被测目标近距离、低仰角的切换,还是对高动态移动目标的交接;无论是对监视区域内目标的预判,还是对监视区域外目标测量,完成率均是百分之百。整个系统稳定性高,大大提高了对目标的测控能力。

5 结束语

遥测/红外跟踪系统并非是将遥测和红外系统叠加起来那么简单,而是使整个系统的捕获和跟踪能力获得了质的飞跃,特别是在现代科学技术不断发展的条件下,相信遥测与红外数据融合方面将有更大的拓展空间。

参考文献:

[1] 赵永刚. 基于雷达/红外数据融合跟踪系统简述 [J]. 电脑与信息技术, 2017, 4: 20-22.

[2] 于洪松, 韩广良, 孙海江, 等. 基于 PCI 总线的 FPGA + DSP 架构通用视频图像处理系统的设计 [J]. 液晶与显示, 2015, 30 (2): 333-339.

[3] 李志坚, 周朝猛, 刘咏. 隔离船摇补偿新方法探究 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9 (19): 5736-5738.

[4] 候旺, 孙晓亮, 尚洋, 等. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势 [J]. 红外技术, 2015, 37 (1): 1-10.

[5] 王承瑶. 陀螺稳定系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[6] St D Ilcev. Airborne. Satellite Antenna Mount and Tracking Systems [J]. IEEE Africon, 2004: 287-289.

[7] 祁海禄, 樊小平, 詹盛武. 某舰载伺服系统位置控制器设计与仿真研究 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30 (264): 64-65.

[8] 黄树彩, 凌强, 韦道知, 等. 红外多光谱图像弹道目标检测算法 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38 (6): 142-146.

[9] 贾建辉, 赵书阳. 船摇速度补偿算法在两轴天线伺服系统中的应用研究 [J]. 遥测遥控, 2017, 38 (2): 62-66.

[10] 王健, 夏利利, 张清, 等. 舰载数字跟踪接收机自动校准新算法研究 [J]. 遥测遥控, 2010, 31 (5): 67-71.

[11] 霍建华, 刘丹, 郭世伟. 遥测 PCM 数据加密技术研究 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (3): 66-68.

[12] 周俊鹏, 陈健, 李炎. 舰载光电跟踪设备的目标预测算法研究 [J]. 光学精密工程, 2017, 25 (2): 519-528.

(上接第 140 页)

参考文献:

[1] 美国的高超声速飞行器发展计划及关键技术分析 [J]. 航天制造技术, 2010 (6): 4-7.

[2] 王威. 高超声速飞行器滑翔段制导方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[3] Brown K R, Harrod E F, Johnson G W. Some new results on space shuttle atmospheric ascent optimization [Z]. 1970.

[4] 王荔豪, 杨凯. 基于粒子群的高超声速飞行器闭环制导研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017 (4): 37-41.

[5] 李新国, 方群. 有翼导弹飞行动力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

[6] 闫晓东. 重复使用跨大气层飞行器动力学虚拟样机设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

[7] 陈小庆, 侯中喜, 刘建霞. 基于直接配点法的滑翔轨迹快速优化设计 [J]. 航空计算技术, 2010 (1): 37-41.

[8] 贺从园. 高超声速飞行器再入段的最优制导 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[9] 洋斌峰. 吸气式空天飞行器闭环上升制导研究 [J]. 飞行力学, 2010 (6): 48-51.

[10] Hussaini MY, Zang TA. Spectral Methods in Fluid-Dynamics [J]. Annu Rev Fluid Mech, 1987, 19: 339-67.

[11] Ross IM, Fahroo F. A pseudospectral transformation of the covectors of optimal control systems [J]. Ifac Symp Series, 2001: 543-8.