

基于“彩虹 4”无人机海洋监测平台的设计与验证

朱振宇, 周乃恩, 贺少帅

(青岛海洋科学与技术国家实验室发展中心, 山东 青岛 266235)

摘要: 针对海洋监测中轻小型无人机抗风能力差、大范围动态监测能力不足的问题, 本文以彩虹-4 型中空长航时无人机为平台进行了载荷安装、电气接口及电磁兼容性设计, 实现了光电吊舱、对海雷达、AIS 多任务载荷的优化集成, 通过开展远距离无人机通信、载荷数据与位姿信息实时同步回传、数据处理等关键技术研究, 形成了一套完整的海洋监测平台软硬件系统。最后经过长时间的地面测试并在海南三亚市东部海域开展远距离飞行试验, 依据应用场景及作业的紧迫程度, 探索了海岛礁成图等常规监测和海上船只目标应急监测应用模式, 验证了平台设计指标, 其中平台续航能力优于 22 h, 作业通讯距离达到 2 300 km, 在无控条件下可见光、红外、SAR 成像精度分别为 15.35 m、21.09 m、6.30 m。结果表明, 该平台能够满足海洋监测技术要求, 具有实际应用价值。

关键词: 中空长航时; 无人机; 海洋监测平台; 多任务载荷; 集成设计

中图分类号: P715.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)03-0122-13

DOI: 10.11759/hyqx20210812001

中国是一个毗邻太平洋的海洋大国, 海域广袤、海岸线漫长、岛屿众多, 海洋对于国家经济社会、生态环境和国防建设具有重要的战略意义。国家“十三五”规划中明确提出, 要统筹规划国家海洋观(监)测网布局, 推进国家海洋环境实时在线监控系统和海外观(监)测系统建设, 逐步形成全球海洋立体观测监测系统^[1]。目前中国已经构建了由卫星、飞机、车辆、船舶、岸基、岛基、油气平台基、浮标、海床基等多元监测平台组成的海洋立体监视监测体系, 可开展全方位、多尺度、长时效的监视监测, 保障海洋生态环境和安全。无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)作为一种高分辨率遥感数据获取以及海域实时动态监测平台, 以其灵活、高效的特点成为了海洋立体监视监测体系的重要组成部分。世界上不少国家都非常重视无人机在海洋监测中的应用, 早在 2002 年美国就将“捕食者”、“全球鹰”等大型无人机投入海洋应用科学研究中, 搭载光电吊舱、对海雷达的“全球鹰”无人机系统已成为美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)对美国海岸线巡查的常规机型; 在欧洲改进型的“全球鹰”也频繁出现在各国海域, 其应用相对成熟; 2019 年希腊海岸警卫队测试了美国通用原子能公司“海上守护者”MQ-9 无人机的海上监视能力, MQ-9 搭载多模式海上搜索雷达和高清/全运动视频光学和红外传感器, 海面搜索雷达系统可开展海上

目标连续跟踪, 并将自动识别系统(automatic identification system, AIS)发射器与雷达检测相关联, 其逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)模式有助于识别和分类超出光学传感器探测范围的舰船, 高清/全运动视频光学和红外传感器可对飞机周围的大型和小型水面舰船进行 360°的远距离全天候实时检测和识别; 2020 年日本海上保安厅为了引进大型无人机作为海洋监测平台进行了试验, 试验机型为“海上守护者”(MQ-9B)无人机, 机身全长 11.7 m, 翼展 24.0 m, 续航时间最多 35 h, 搭载光电吊舱和对海雷达, 通过卫星传输系统即可远程操控无人机和实时回传监测数据, 其作业半径能覆盖日本的专属经济区。与国外相比, 我国的无人机技术发展较为成熟, 尤其是轻小型无人机在各个领域都广泛应用, 不少单位和学者利用无人机在海域使用动态监管^[2-3]、海洋灾害监视监测^[4-8]、海岛礁测绘^[9-11]、突发事件(溢油、危化品)应急监测^[12]等方面开展技术

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0203)

[Foundation: Marine S&T Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), No. 2018SDKJ0203]

作者简介: 朱振宇(1985—), 男, 浙江台州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事无人机系统总体设计、无人机海洋监测应用研究, 电话: 15311815927, E-mail: ch_zhuzhenyu@163.com

研究与应用示范。上述研究大多数采用的是小型无人机，其抗风能力无法有效应对海洋复杂多变的气象条件^[13]，远距离测控和大数据量信息传输制约大范围实时动态监测的开展^[14]，载荷量和飞机尺寸限制了多种类型传感器协同工作的可能性。近年来，随着军民融合发展战略的持续推进，以“彩虹”“翼龙”为代表的中空长航时大型无人机开始在民用领域崭露头角，2015年中国航天科技集团公司十一院在山东省烟台市沿海地区成功实施了“蓝色海鸥”“彩虹-4”无人机海洋示范应用，是我国首次大型中空长航时无人机系统海洋示范应用；2020年中国气象局采用腾盾科技公司的大型双发长航时“双尾蝎”无人机携带气象雷达、激光测风雷达、光电侦察吊舱和温湿压探测器等多种气象探测设备，实施了台风海上观测作业，达到预先设定目标。通过国内外无人机海洋监测平台对比可以发现，国外在大型无人机多载荷集成的海洋监测应用较为成熟，而我国基于轻小型无人机的海洋监测研究较为普遍，只有近几年基于大型无人机的海洋监测平台应用才有公开报道。

针对海洋监测应用需求，本文依托“海洋高端装备技术创新工程”专项，以“彩虹-4型”(CH-4)无人机为平台研究光电吊舱、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、船舶自动识别系统等多任务载荷优化集成、远距离无人机实时监管及载荷数据实时回传、监测数据与位姿数据同步打包下传等关键技术，通过在海南三亚市东部海域开展飞行实验，探索海洋监测常规任务和应急任务应用模式，验证了平台集成方法的可行性以及平台功能性能指标，可为我国开展中空长航时无人机海洋监测工程化应用提供新的解决方案。

1 平台总体设计

海洋监测平台对无人机系统有较高的要求，通常要满足“飞得到”“看得见”“飞得好”等基本条件。“飞得到、飞得好”是前提，即飞机的续航时间要满足工作要求，以远海岛礁测绘为例，一般要求无人机作业半径在1 000 km以上，往返作业里程2 000 km以上，续航时间要求不低于20 h，同时在保证飞行安全的前提下，尽可能获取质量较好的监测数据成果。“看得见”是关键，即在海洋监测过程中，地面指挥中心能实时监控无人机飞行状态，载荷数据能实时回传地面。基于上述技术要求和项目设计目标，选用CH-4型中空长航时无人机，搭载对海雷达、光电吊舱、船舶自动识别系统等任务载荷，并通过遥控遥测链路实时接收地面指

挥舱指令，控制任务载荷开展海上目标识别、跟踪，海岛礁测绘成图等监测任务，同时载荷数据又可通过遥控遥测链路实时回传地面，为指挥决策提供数据支撑。海洋监测平台主要包括无人机、任务载荷集成模块、遥控遥测链路模块、任务规划与数据处理模块等，总体设计框架图如图1所示。针对不同海洋监测任务需求，系统需要根据任务规划软件设计相应航线，引导无人机系统执行相关任务，此时载荷设备可根据任务需求获取不同类型数据。船舶自动识别系统辅助对海雷达开展目标搜索、跟踪，雷达方位坐标信息引导光电吊舱联动，对目标信息进行查证分析，并将相关数据实时回传地面；在对海岛、滩涂等固定目标进行常规监测时，可利用光电吊舱、雷达分别获取目标区域不同时序的正射影像、SAR成像图等测绘成果数据，为下一步开展目标区域动态变化监测提供基础数据。

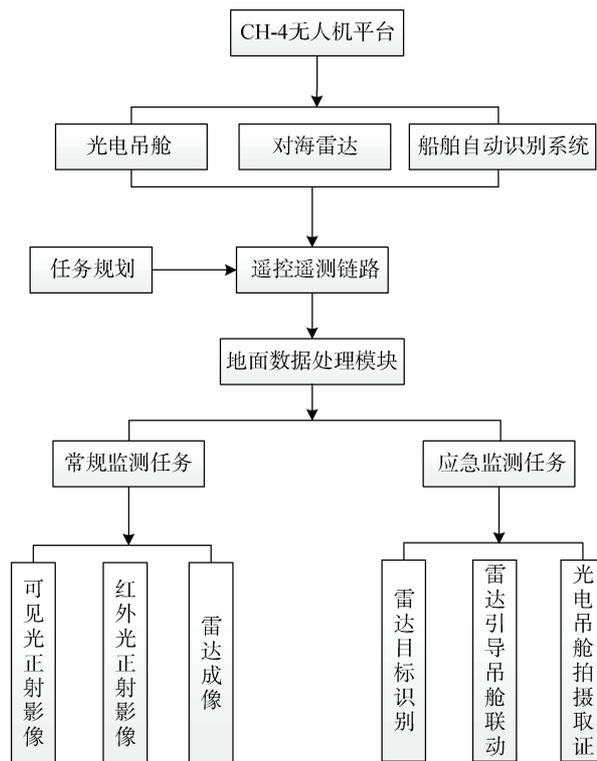


图1 总体设计框架图

Fig. 1 Overall design framework diagram

2 平台硬件设计与集成

2.1 无人机简介

CH-4无人机是中国航天空气动力技术研究院在“彩虹-3”无人机基础上研发的一种中空长航时无人机，目前在应急测绘^[15]、航空物探^[16]、海事监管^[17]等领域，

以 CH-4 无人机为平台进行的系统集成设计应用, 均取得了较好的效果。CH-4 无人机机长 8.5 m, 高 3.4 m, 翼展 18 m, 最大起飞质量 1 330 kg, 载荷 100 kg 以下情况下可连续飞行 30 h 以上, 满载 345 kg 情况下可飞行 12 h, 具有装载能力强、留空时间长、使用半径大、可扩展性强等特点, 能够满足海洋监测无人机“飞得到”技术要求, 其主要性能指标如下表 1 所示。通过 CH-4 无人机

性能指标可知, 与一般小型无人机相比, 其作业半径更大, 在同等载荷条件下续航能力更强。除此之外, 可扩展性强也是 CH-4 无人机的一大优势, 目前在已公开的民用项目中, 其已集成了光学面阵相机、高光谱/多光谱传感器、SAR、倾斜相机、雷达高度计、光泵磁力仪等, 结果表明 CH-4 无人机可兼容不同载荷的硬件接口及数据传输协议。

表 1 CH-4 型中空长航时无人机飞行平台主要性能指标表

Tab. 1 Main performance indicators of the CH-4 medium-altitude long-endurance UAV flight platform

主要性能指标	参数	主要性能指标	参数	主要性能指标	参数
最大升限	7 500 m	最大航速	230 km/h	续航时间	>30 h
机身长度	8.5 m	机身高度	3.4 m	翼展	18 m
有效载荷	345 kg	视距测控距离	250 km	最大作业半径	2 000 km
抗风能力	8 级	起降方式	滑跑	燃油	汽油

2.2 多任务载荷集成设计

结合任务规划需求, 本平台主要搭载对海多功能雷达、光电吊舱、船舶 AIS 三种载荷。机载对海雷达由中国电子科技集团公司第三十八研究所研制, 设备型号为 JY-201(X), 质量 70 kg, 具备海面广域搜索监测、运动目标监测、条带式合成孔径成像等功能, 其主要性能指标见表 2。

光电吊舱采用北京星网宇达科技股份有限公

司的 SCA350 型设备, 包括两轴陀螺稳定平台、可见光摄像机、红外热像仪、图像存储模块、图像跟踪器等部件, 主要用于目标查证、跟踪以及区域快速成图等, 其内部集成有 FPGA 芯片, 可实时对视频图像增强处理, 解决由于雾霾、光照不均等因素造成的图像降质问题, 且增加了便于观瞄的辅助功能, 便于后续的目标识别与跟踪, 其主要参数见表 3。

表 2 JY-201(X)型对海雷达主要性能指标表

Tab. 2 Main performance indicators of the JY-201(X) sea radar

主要性能指标	参数
工作模式	海面广域搜索监视(maritime wide area search, MWAS)、条带和聚束合成孔径成像(SAR)、海面运动目标检测(sea surface moving target indication, SMTI)
总质量	70 kg
目标探测距离	≥ 50 km(对大型船只目标)
成像距离	≥ 25 km
成像分辨率	条带模式: 带宽 ≥ 5 km; 分辨率: ≤ 10 m 聚束模式: 分辨率: ≤ 5 m
精度(MWAS 模式)	距离: ≤ 75 m; 方位: ≤ 0.6°
功耗	≤ 500 W

表 3 SCA350-RB02 型光电吊舱主要性能指标表

Tab. 3 Main performance indicators of the SCA350-RB02 photoelectric pod

主要性能指标	参数	主要性能指标	参数
总质量	30 kg	回转直径	350 mm
吊舱高度	584.5 mm	红外探测器	非制冷焦平面
可见光变焦倍数	30 倍	红外像元数	640×512
可见光焦距范围	4.3~129 mm	红外工作波段	长波 8~14 μm
可见光视场角	6.5°~62°	红外焦距	定焦镜头 50 mm
可见光像元数	1 920×1 080	红外视场角	12.4°×9.9°

机载 AIS 用于接收海面船舶动/静态相关信息, 提高无人机的对海侦察能力, 由机载超短波天线、AIS 接收机及高频电缆组成, 其工作频段为 108~174 MHz, 侦收频点为 161.975 MHz 和 162.025 MHz。在作业过程中 AIS 接收天线接收 AIS 电磁信号, 由 AIS 接收机解析 AIS 报文, AIS 将收到的报文传给飞管模块, 再由飞管模块发送给链路的收发组合单元, 然后下载到指挥舱。在地面指挥舱内的 AIS 海图显示软件上可显示船只的位置、航向、航速等信息, 同时也可以显示无人机的位置、速度等信息, 更加直观的显示无人机与目标船只的位置关系, 并通过对比发现关闭或未安装 AIS 系统的可疑船只。

在不增加载荷质量的前提下, 优化载荷设备选型及集成设计, 满足平台续航时间、作业半径及飞行安全要求。

1) 安装设计

在监测数据采集时, 需同步获取载荷的位置和姿态信息, 为了减轻载荷质量, 本文并未集成高精度的定位定姿系统(position and orientation system, POS), 而是利用飞机自身的组合惯导系统为载荷提供位姿信息, 因此在载荷安装时必须刚性固联于飞机平台上, 以保证位姿信息的有效性, 不能借助运动补偿稳定平台。光电吊舱安装时要求视场范围内不受安装结构件和飞机腹部盖板的遮挡, 将其安装在机腹最前方的位置; 根据对海雷达侧视的作业模式, 将其天线安装在机腹中部右侧位置, AIS 天线朝下安装, 雷达及 AIS 功能模块安装在机腹内部, 安装结构如图 2 所示。

2) 电气设计

为了保证机上供电安全, 在电气设计时由 CH-4 无人机提供一个总的供电转接头, 通过电源转接线

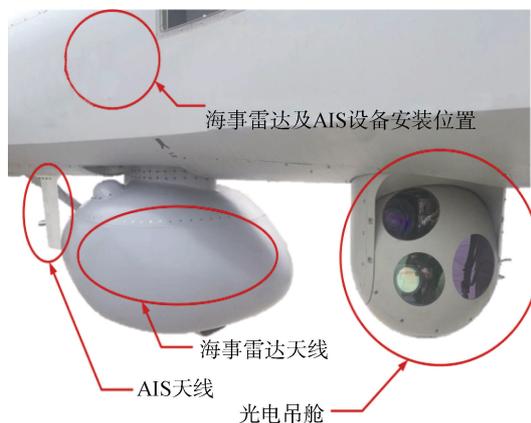


图 2 多任务载荷集成实物图
Fig. 2 Multitask load integrated physical map

分出 3 路分别给光电吊舱、对海雷达、AIS 供电。供电转接头具有短路保护功能, 可在任务载荷发生意外故障、出现短路时自动切断无人机对载荷系统的供电, 最大限度保护无人机的安全飞行。CH-4 无人机供电单元对载荷的最大输出功率为 644 W, 本平台中光电吊舱功耗为 18 W, AIS 功耗为 10 W, 对海雷达功耗 180 W, 总功耗为 208 W, 远远小于 CH-4 的最大输出功率。

3) 电磁兼容性设计

载荷功能模块工作时往往处于复杂的电磁干扰环境中, 因此必须进行电磁兼容性设计, 本文采用接地、屏蔽、优化电缆走线等方式降低电磁干扰, 保证载荷设备和无人机系统正常兼容工作。对海雷达功率较大对飞机电磁干扰也较大, 在其机腹内部模块覆盖锡箔纸, 屏蔽内部辐射; 卫星通信大功率发射设备安装在机头前方, 远离其他信号接收设备, 同时尽可能保证电源线与信号线不交叉。实物图如图 3 所示。

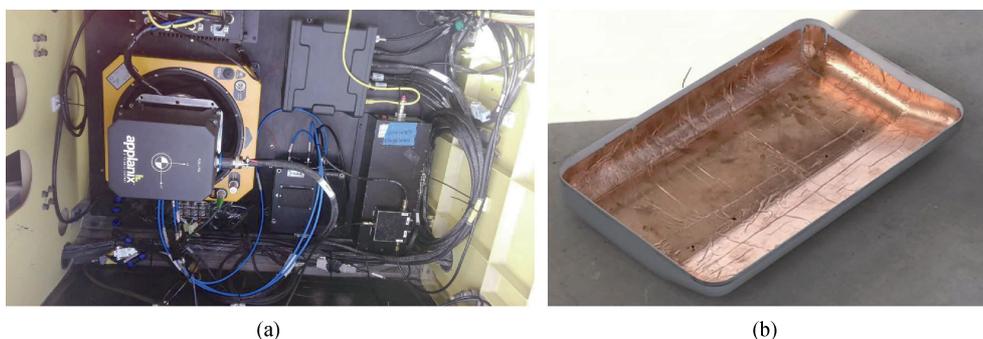


图 3 载荷电缆走线(a)、覆盖有锡纸的内部载荷模块安装盖(b)
Fig. 3 Cable routing of flight load (a), and inner load module mounting cover covered with tin foil (b)

2.3 遥控遥测链路设计

在海洋监测过程中，“看得见”是关键，不仅要要求地面指挥中心实时监控无人机飞行状态，还要能够做到载荷数据的实时回传。受限于载荷能力，小型无人机通常只能搭载数传电台和图传电台^[18]实现无人机近距离的通信和数据传输，而CH-4无人机可搭载卫星通信(以下简称卫通)设备实现远距离通信。为

了满足载荷数据的实时大范围传输需求，本文设计了双链路模式，即同时搭载视距和卫通链路，遥控遥测链路示意图如下图 4 所示。在通视条件下视距链路的最大测控距离为 200 km，是飞机与现场地面指挥舱的通信链路，卫通链路可实现 2 000 km 以上的远距离通信，卫通地面接收站部署在海洋指挥中心，可实现不同地点载荷数据的实时接收。

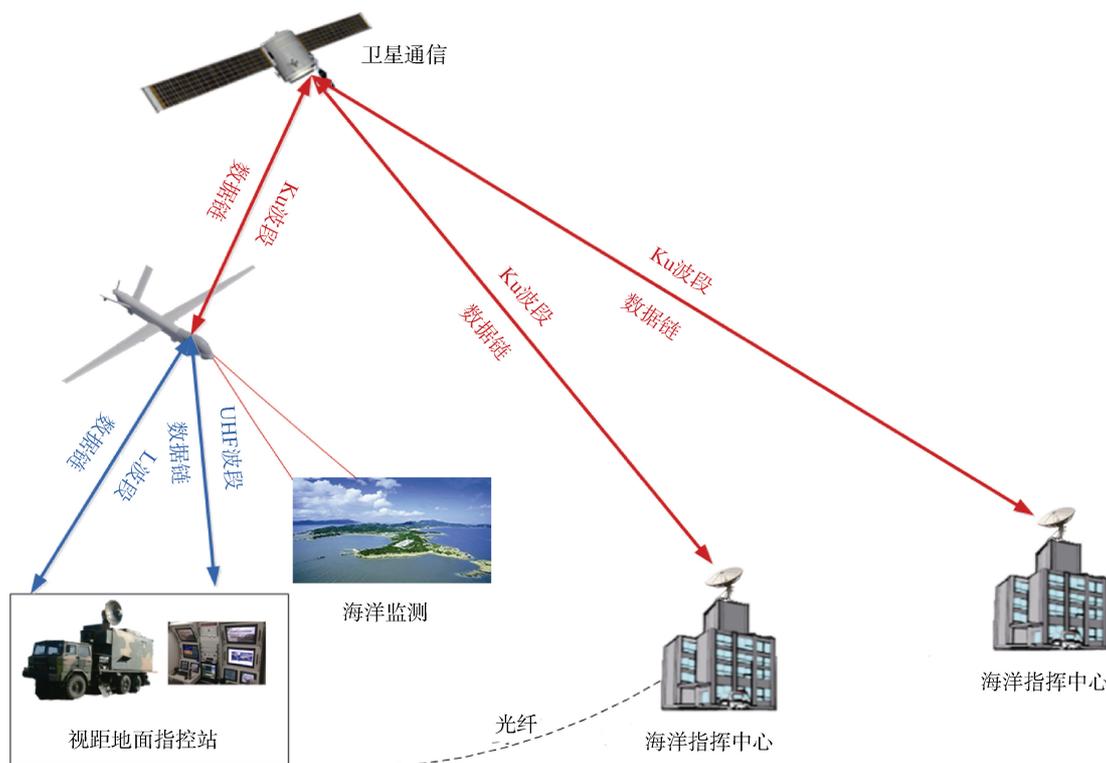


图 4 遥控遥测链路示意图

Fig. 4 Schematic of remote telemetry link

卫通系统分为机载端和地面端，其中机载端包括机载动中通天线、机载调制解调器、机载功放等；地面端包括地面卫通天线、卫通业务调制解调器、数据处理终端、网络交换机等，其主要性能参数如表 4 所示，实际安装如图 5 所示。为了将载荷数据打

包下传，专门设计了数据采集板卡，该板卡同时接入载荷设备接口和惯导接口，利用惯导脉冲信号为载荷数据记录时间标识，从根本上消除无线传输延时带来的误差，优化载荷数据与位姿信息的时间同步精度。

表 4 卫星通信系统主要性能指标表

Tab. 4 Main performance indicators of the satellite communication system

主要性能指标	参数	主要性能指标	参数
工作频段	Ku 频段	通信速率	200 kbit/s~8 Mbit/s
作用距离	卫星波束覆盖范围	机载天线等效口径	0.65 m
传输误码率	$\leq 1 \times 10^{-6}$	数据传输延时	≤ 350 ms
调制方式	二进制相移调制	机载端总功耗	≤ 550 W
机载端总质量	≤ 27 kg	信号滚降系数	0.1~0.35



图 5 机载动中通天线安装实物图

Fig. 5 Installation of the airborne mobile antenna

2.4 载荷通信接口设计

在无人机对海监测过程中要求地面指挥舱能实时监控无人机的飞行状况，无人机能向地面指挥系

统实时回传载荷和飞行数据，地面指挥系统也可根据需求向无人机发送指令来控制飞行和载荷作业。多任务载荷通信接口包括向光电吊舱、对海雷达、AIS 等载荷设备发送控制指令的上行链路接口和接收三种载荷作业数据以及飞控信息的下行链路接口。上行链路通信采用一对一模式，即视距和卫通链路地面指挥站各自只有一个端口能上传指令，为了安全起见，还各自设计了一个备用端口。用于数据实时回传的下行链路采用一对多模式，即一个载荷数据可通过组播形式分发给多个地址接收，这样就可以满足不同设备同时接收数据的需求。另外为了实现载荷数据与遥测数据的同步下传，在机载端需要对载荷数据和遥测数据同步打包下传，用自定义标识符加以区分，在地面接收端通过解析每包数据的标识符分离载荷数据与遥测数据^[19]，消除回传数据时间不同步为后续数据处理带来位置偏差，机上载荷通信接口设计如图 6 所示。

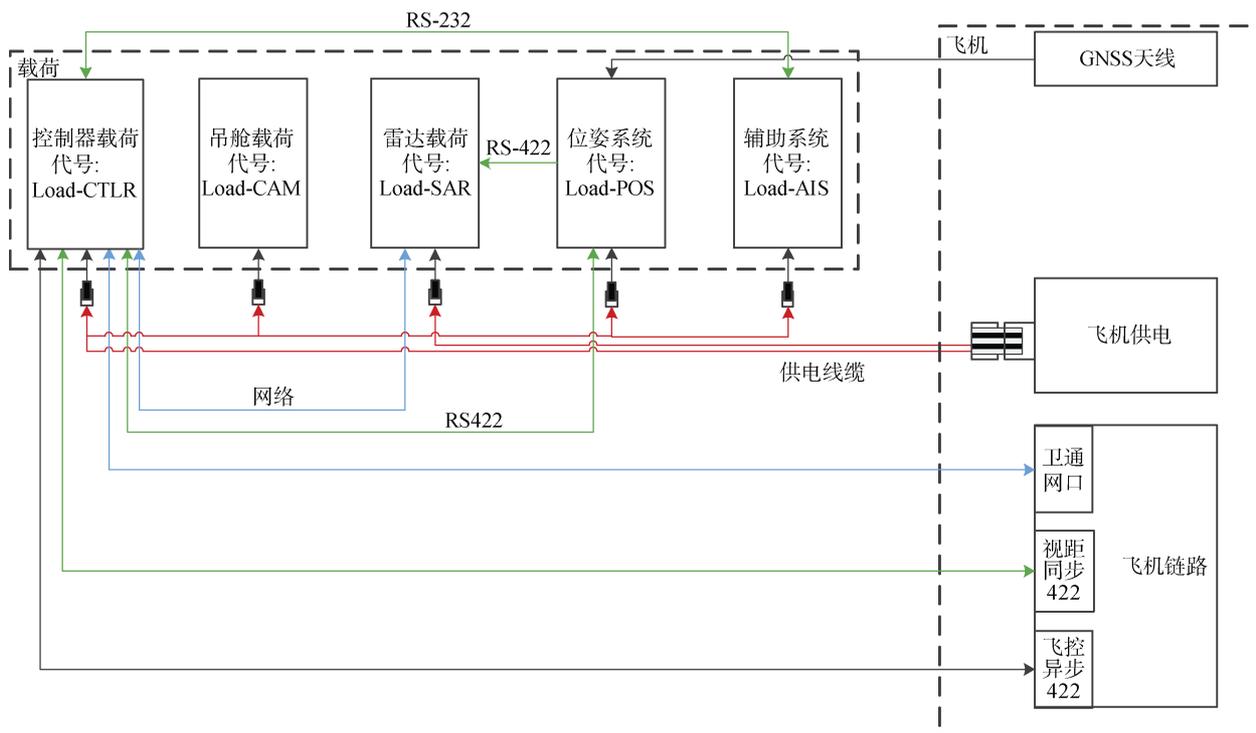


图 6 机上载荷通信接口设计图

Fig. 6 Design diagram of on-board payload communication interface

3 软件模块

地面指挥舱主要集成了无人机飞行监控、任务规划与数据处理两大软件系统，飞行监控系统主要用于无人机飞行控制及飞行状态监管，任务规划与数据处

理系统用于海洋监测任务规划、载荷数据接收与处理、多源监测信息显示、数据成果存储管理等。

3.1 任务规划

海洋监测任务一般分为常规监测任务和应急监

测任务^[20]。常规监测任务主要包括用海规划、海岸线及沿海滩涂监测等。这类任务所需数据通常为正射影像、视频数据等,其任务规划可采用航摄设计方案获取满足旁向重叠度要求^[21]的可见光视频数据,最终提取关键帧拼接为整体影像。应急监测任务针对突发紧急事件,需要快速作出响应。这类任务需要将现场画面以视频、图像形式实时回传指挥中心或利用雷达对目标进行搜索跟踪,其任务规划没有明确方案,需要根据现场情况实时修改航线或根据监测目标航向实时修正自身航线。任务规划是海洋监测平台“飞得好”的前提,CH-4 飞行控制软件可以实时规划飞行航线,但其无法进行航空摄影测量的航线设计,因此本文在此基础上结合航线设计算法^[22]二次开发实现基于数字高程模型的无人机航线自适应设计。

3.2 数据处理

通过光电吊舱载荷接口下传的数据流中不仅包括可见光、红外视频码流,还包括同一时刻获取的遥测数据,软件系统根据数据包帧头的标识符区分可见光、红外和遥测数据,其中视频流通过解码模块获取每帧影像,遥测数据根据飞控解析协议得到位置和姿态信息,最后通过视频流地理编码^[23]技术建立每帧影像与位姿数据的一一映射关系,为视频帧正

射纠正及拼接处理提供地理参考。在拼接之前,由于视频冗余度较高,需要对视频进行抽帧处理,提取满足重叠度的视频帧参与拼接,这些视频帧称为关键帧,关键帧的提取采用固定重叠度方法进行,即每帧关键帧都满足一定的重叠度要求,相邻视频帧之间的航向重叠度可采用式(1)计算:

$$p = 1 - \frac{S}{W \times \mu_w \times H / f}, \quad (1)$$

其中, S 为相邻视频帧中心点之间的地面距离,可通过定位姿信息中的坐标计算; f 为传感器焦距; W 、 μ_w 分别是视频帧航向像素个数和像素物理尺寸; H 为视频帧获取时刻的相对航高。按照上述算法可获取满足重叠度要求的视频关键帧,下一步利用 PhotoScan 软件对其进行拼接处理,获取目标区域整幅影像。

对海雷达将锁定目标的距离、方位、速度等信息实时回传地面,软件系统利用雷达引导视频联动算法^[24]自动计算出目标在雷达-视频联动模型中对应的光电吊舱方位角和俯仰角,通过上传链路发送控制指令,引导光电吊舱锁定目标,实现目标的实时复核。利用对海雷达设备厂商提供的数据处理软件实现条带和聚束两种模式下 SAR 成像处理,包括单景单极化与全极化图像的几何校正以及多景图像的校正、拼接、地理编码等。任务规划与数据处理系统的作业流程,如图 7 所示。

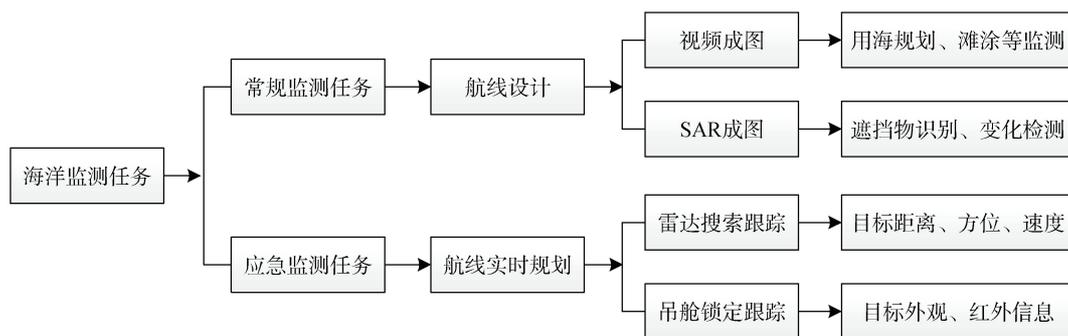


图 7 任务规划与数据处理流程
Fig. 7 Task planning and data processing flow

4 试验验证

4.1 地面测试

载荷集成之后,需要开展地面联调测试,主要测试电磁兼容性、载荷工作状态、链路通信情况等,首先进行地面通电测试,各项指标通过后再开展地面着车测试。地面通电测试是由外接电源对飞机进

行供电,测试载荷全状态工作条件下是否会相互干扰、链路通信是否正常,本平台进行了 48 h 不间断供电测试,期间未发生载荷故障,数据传输正常无间断。之后又进行了地面着车测试,测试发动机抖动对载荷设备的影响以及载荷供电稳定性,经过长达 12 h 的着车测试验证了载荷集成的可靠性,满足飞行测试要求。

4.2 飞行测试

4.2.1 试验区概况

为了验证该平台作业半径、续航能力以及载荷作业性能指标等,本文开展了飞行试验,试验区位于海南省三亚市东部海域,东起分界洲岛海域,西至蜈支洲岛海域,东西长 107 km,南北宽 70 km,测区包括分界洲岛、蜈支洲岛等海岛,海岸线滩涂、人工建筑设施等。

4.2.2 航线设计

常规监测任务包括分界洲岛可见光/红外视频成像、条带模式下的海岸带 SAR 成像。光电吊舱可见光为变焦镜头,焦距范围为 4.3~129 mm,设计地面分辨率为 0.5 m,旁向重叠度为 35%,根据摄影比例尺公式反算焦距为 11.5 mm,因此在飞行作业中需要将可见光焦距锁定为 11.5 mm。红外镜头为定焦镜头,焦距为 30 mm,成像单元物理尺寸为 18 μm,设计地面分辨率为 0.5 m,旁向重叠度 35%,按照航摄比例尺式(2)计算航高为 820 m,共敷设 11 条航线。

$$\frac{f}{H} = \frac{\mu}{D}, \quad (2)$$

式中, f 为焦距, μ 为成像单元物理尺寸, D 为地面分辨率, H 为设计航高。

由于对海雷达天线与垂直方向的夹角为 85°~88°,为了满足水平探测距离为 50 km 的要求,根据三角函数计算飞行航高在 2 620~4 374 m,而作业区域的空域管控为 3 500 m 以下,因此在 SAR 条带成像模式,本文设计定高 3 000 m 飞行,采用右侧式作业方式。具体航线设计如图 8 所示。



图 8 常规监测任务光电吊舱航线设计
Fig. 8 Photoelectric pods for routine monitoring tasks

应急监测任务模拟飞机从某机场起飞到目标海域开展船只搜索、识别、查证与跟踪等,其航线设计为从机场到目标海域为固定航线,到达目标海域后进行大半径绕飞,操控对海雷达搜索目标船只,锁定跟踪。应急监测实际飞行航迹如图 9 所示。蓝色轨迹为指挥舱在飞行前规划的辅助飞行航线,红色为实际作业飞行航迹,包括红色矩形框的绕飞航迹和长条状折返航迹。



图 9 应急监测实时规划航迹结果
Fig. 9 Results of emergency monitoring real-time planning track results

4.2.3 试验结果

视距指挥舱部署在三亚市某机场,距离试验区最远距离 190 km,卫通便携式地面站部署在青岛海洋实验室,距离试验区 2 300 km,在整个试验过程中,地面接收站与飞机之间通讯正常,无中断,光电吊舱获取的视频数据实时回传地面。任务规划航时约 4.5 h,为了验证平台续航能力,在完成规划航线继续在试验区绕飞,总载荷质量为 137 kg,理论续航 25 h,实际飞行 22 h 后安全降落。通过试验结果可知,该海洋监测平台的作业半径、续航能力、通信距离均满足设计指标要求,平台实际飞行及数据回传地面指挥舱如图 10 所示。图 10a 为 CH-4 无人机起飞和降落时的画面,图 10b 为指挥舱内载荷监控席位实时画面,其中最上方屏幕为 AIS 实时画面,中间屏幕为光电吊舱红外模式目标锁定跟踪实时画面。

针对常规监测任务获取的分界洲岛可见光、红外视频数据及其对应的遥测数据,开展遥测数据解析、红外视频增强、视频关键帧提取、视频地理编码、关键帧拼接等处理,得到分界洲岛可见光及红外

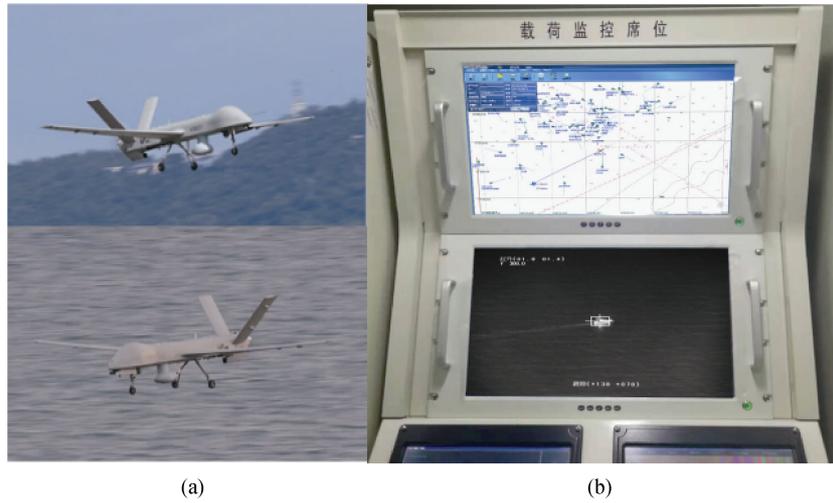


图 10 CH-4 无人机实际飞行作业图(a)及实时回传软件界面(b)

Fig. 10 CH-4 UAV actual flight operation diagram (a) and real-time return software interface (b)

视频拼接全图,如图 11 所示。由处理结果可以看出,分界洲岛全貌可见光和红外视频影像获取清晰,由于没有在地面布设控制点,选择借助国家地理信息公共服务平台天地图卫星遥感影像数据评估成果精度。首先将拼接成果叠加在三维地理信息平台中,以天地图卫星遥感影像地图为基准,均匀选取同名地物点进行平面距离量测,分析其中误差,统计数据如表 5 所示。

在无控制条件下可见光拼接影像,如下图 11 所示,其相对坐标中误差为 15.35 m,红外拼接影像相对中误差为 21.09 m。

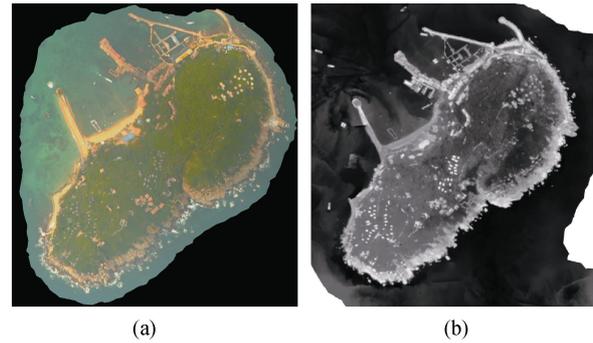


图 11 分界洲岛可见光(a)、红外(b)视频拼接效果
Fig. 11 Visible light (a) and infrared (b) video stitching effects of Fenjiezhou Island

表 5 试验成果数据精度统计表(单位: m)

Tab. 5 Results statistics of the data accuracy of the test (unit: m)

序号	可见光拼接成果与天地图差值	红外拼接成果与天地图差值	SAR 成像结果与天地图差值
1	18.23	20.34	6.09
2	14.34	19.28	5.32
3	16.56	22.78	6.89
4	17.21	21.48	7.24
5	13.39	20.89	7.45
6	15.51	18.74	6.08
7	14.82	21.78	5.41
8	16.02	20.51	5.87
9	13.59	21.93	6.32
10	12.88	22.78	5.99
中误差	15.35	21.09	6.30

对海雷达条带成像模式对海岸线目标区域进行探测, 获取 SAR 数据, 经过辐射校正、地理编码、几何纠正、拼接等处理得到目标区域 SAR 成像结果, 部分成果及局部放大图如下图 12 所示, SAR 成像清晰无噪点, 条带宽度满足设计指标要求, 坐标相对中误差为 6.30 m。

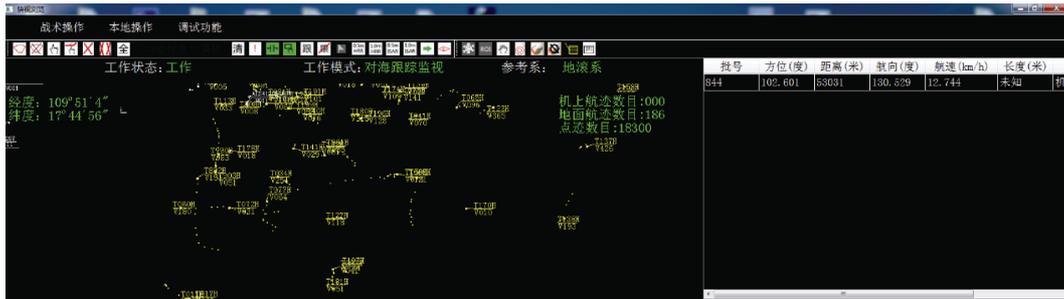


图 12 对海雷达条带模式下成像结果

Fig. 12 Imaging results in the strip mode of the sea radar

通过试验结果可知, 常规监测任务获取的分界洲岛可见光及红外视频、沿海滩涂 SAR 成像数据质量合格, 且在无控制点条件下拼接结果坐标相对中误差较小, 能够用于下一步的海洋监测分析, 满足“飞得好”技术要求。

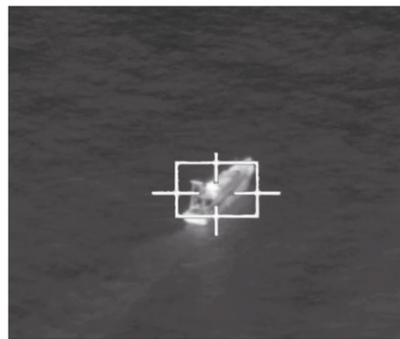
在应急监测任务中, 开启雷达对海跟踪监视模式对目标区域进行探测, 获取船只的距离、方位、速度、航向等信息, 飞机朝目标船只方向飞行, 对海雷达跟踪目标并将获取信息实时回传地面。软件系统实时计算目标在雷达-视频联动模型中对应的光电吊舱方位角和俯仰角, 进而引导光电吊舱锁定目标船只, 拍摄取证, 监测结果如图 13 所示, 从图中可以看出对海雷达(图 13a)能够同时跟踪多个船只目标, 并显示其方位、距离、航速等信息; 雷达-视频联动模式下, 光电吊舱可轻松锁定目标船只(图 13b、图 13c), 便于拍摄取证; AIS 可显示目标船只与飞机位置关系, 辅助搜索跟踪。



(a)



(b)



(c)

图 13 对海雷达条带模式下成像结果

Fig. 13 Target ship monitoring results of sea radar (a), photoelectric pod (b, c)

5 结论

围绕海洋监测应用需求, 利用设计集成的海洋监测平台开展多个监测任务试验, 验证了该平台是解决海洋监测长航时、大范围作业的有效技术装备。

1) 针对海洋监测长航时指标要求, 优化载荷设备选型, 实现了多任务载荷的优化集成, 平台续航时间大于 22 h, 作业半径为 2 000 km, 从就近机场起飞, 能覆盖中国大部分远海岛礁及海域。

2) 为了提高海洋监测过程无人机通信距离,

设计了视距与卫通双链路模式,根据作业距离自动切换链路,实现了无人机远距离全航程的实时监管以及载荷数据的实时回传。针对常规监测任务数据处理需求,设计了载荷数据与位姿信息的同步打包下传板卡,实现了载荷数据的无控地理编码处理。

3) 针对常规监测任务获取了分界洲岛可见光和红外视频数据,并进行了地理编码、拼接处理,验证了成图精度,在应急监测任务中对海雷达获取了目标船只的距离、方位、速度、航向等信息,雷达-视频联动模式下,光电吊舱锁定了目标船只,用于拍摄取证。

在下一步研究工作中,将继续开展高光谱、激光雷达等多任务载荷协同监测研究,为开展海洋环境污染监测应用做好技术准备,同时还需进一步挖掘监测数据成果应用价值,充分发挥 CH-4 无人机优势,强化海洋立体监测体系。

参考文献:

- [1] 云行. “十三五”规划之海洋篇[J]. 卫星应用, 2016(6): 24-25.
- [2] 王飞, 陈一鹤, 赵建华, 等. 海域无人机全景监视监测技术及其应用[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(10): 65-68.
WANG Fei, CHEN Yihe, ZHAO Jianhua, et al. Panoramic surveillance and monitoring technology of unmanned aerial vehicle in sea area and its application[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(10): 65-68.
- [3] 雷伊娉, 李学恒, 雷静, 等. 基于无人机平台的海域监管关键技术及其应用[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(12): 77-80.
LEI Yiping, LI Xueheng, LEI Jing, et al. The key technologies of sea area supervision based on UAV platform and its application[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(12): 77-80.
- [4] 张永年. 无人机低空遥感海洋监测应用探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(8): 143-145.
ZHANG Yongnian. Discussion on application of uav low-altituderemote sensing marine monitoring[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(8): 143-145.
- [5] 张元敏. 无人机航测技术在入海排污口排查中的应用[J]. 测绘通报, 2020(1): 146-149, 153.
ZHANG Yuanmin. Application of UAV aerial survey technology in sewage outlet investigation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(1): 146-149, 153.
- [6] 高兴国, 田梓文, 麻德明, 等. 无人机 LiDAR 系统在砂质海岸监测中的应用[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(3): 468-472.
GAO Xingguo, TIAN Zhiwen, MA Deming, et al. Application of UAV LiDAR system in sandy coast monitoring[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(3): 468-472.
- [7] SHI Z H, YU L, CAO D S, et al. Airborne ultraviolet imaging system for oil slick surveillance: oil-seawater contrast, imaging concept, signal-to-noise ratio, optical design, and optomechanical model[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7648-7655.
- [8] NUNZIATA F, GAMBARDELLA A, MIGLIACCIO M. On the degree of polarization for SAR sea oil slick observation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 78(4): 41-49.
- [9] 刘森波, 周兴华, 林旭波, 等. 无人机航摄系统在海岸带大比例尺测图中的应用[J]. 测绘通报, 2017(9): 156-158.
LIU Senbo, ZHOU Xinghua, LIN Xuebo, et al. Application of UAV aerial camera system in large-scale surveying and mapping of coastal zone[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(9): 156-158.
- [10] 毕凯, 丁晓波. 轻小型无人机远海岛礁航测关键技术研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(6): 8-16.
BI Kai, DING Xiaobo. Research on the key technology of aerial photogrammetry for islands or reefs far from the mainland based on light and small UAV[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(6): 8-16.
- [11] 张凯, 张好运, 卢旭升, 等. 无人机海岛礁航空摄影测量技术应用[J]. 测绘通报, 2018(9): 87-90.
ZHANG Kai, ZHANG Haoyun, LU Xusheng, et al. Application of unmanned aerial vehicle aerial photogrammetry in island[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(9): 87-90.
- [12] 任广波, 过杰, 马毅, 等. 海面溢油无人机高光谱遥感检测与厚度估算方法[J]. 海洋学报, 2019, 41(5): 146-158.
REN Guangbo, GUO Jie, MA Yi, et al. Oil spill detection and slick thickness measurement via UAV Hyperspectral Imaging[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5): 146-158.
- [13] 杨晓彤, 郭灿文, 邢喆, 等. 无人机海洋测绘应用进展与展望[J]. 海洋信息, 2019, 34(3): 12-17.
YANG Xiaotong, GUO Canwen, XING Zhe, et al. Progresses and perspectives of marine surveying and mapping based on UAV[J]. Marine Information, 2019, 34(3): 12-17.
- [14] 黄天进. 无人机海洋测绘应用进展与展望[J]. 船舶物资与市场, 2020(7): 8-9.
HUANG Tianjin. Progresses and perspectives of marine

- surveying and mapping based on UAV[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2020(7): 8-9.
- [15] 周兴霞, 黄青伦, 武昊. 四川中航时固定翼无人机航空应急测绘系统总体技术设计与集成验证[J]. *测绘*, 2019, 42(13): 105-108.
ZHOU Xingxia, HUANG Qinglun, WU Hao. The overall design and integrated verification of sichuan medium-duration fixed-wing UAS for emergency surveying and mapping[J]. *Surveying and Mapping*, 2019, 42(13): 105-108.
- [16] 鞠星, 韩松, 郭华, 等. 彩虹 4 无人机在航空物探领域的的安全应用[J]. *中国矿业*, 2020, 29(S2): 159-162.
JU Xing, HAN Song, GUO Hua, et al. The safe application of CH-4 unmaneed aerial vehicle in aero geophysics[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(S2): 159-162.
- [17] 闫东, 周乃恩. 彩虹无人机系列应用及展望[J]. *软件*, 2018, 39(9): 117-122.
YAN Dong, ZHOU Naien. The applications and prospects of CH UAV Systems[J]. *Computer Engineering & Software*, 2018, 39(9): 117-122.
- [18] 张继贤, 刘飞, 王坚. 轻小型无人机测绘遥感系统研究进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(3): 708-724.
ZHANG Jixian, LIU Fei, WANG Jian. Review of the light-weighted and small UAV system for aerial photography and remote sensing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(3): 708-724.
- [19] 孙玉超, 曾纪胜, 田松, 等. 面向海岸线修测的无人机照片视频获取及管理研究[J]. *海洋技术学报*, 2020, 39(5): 13-18.
SUN Yuchao, ZENG Jisheng, TIAN Song, et al. Research on the acquisition and management of uav photos and videos for coastline survey[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2020, 39(5): 13-18.
- [20] 赵雪, 王厚军, 刘惠. 海域无人机监视监测业务流程设计[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(3): 24-27.
ZHAO Xue, WANG Houjun, LIU Hui. Design of surveillance and monitoring business process for sea area unmanned air vehicle[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(3): 24-27.
- [21] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
ZHANG Jianqing, PAN Li, WANG Shugen. *Photogrammetry*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [22] 柳忠伟, 程新文, 李英成, 等. 利用DEM的自适应航线设计方法[J]. *测绘科学*, 2014, 39(12): 143-147.
LIU Zhongwei, CHENG Xinwen, LI Yingcheng, et al. Adaptive strips design method based on DEM data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(12): 143-147.
- [23] 孙新博. 无人机视频地理编码系统设计与实现[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2017.
SUN Xinbo. Design and Implementation of UAV video geographic coding system[D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2017.
- [24] 屈立成, 高芬芬, 柏超, 等. 雷达引导的视频联动监控模型及算法[J]. *计算机应用*, 2018, 38(12): 3625-3630.
QU Licheng, GAO Fenfen, BAI Chao, et al. Radar-guided video linkage surveillance model and algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(12): 3625-3630.

Design and verification of a marine monitoring system platform based on CH-4 UAV

ZHU Zhen-yu, ZHOU Nai-en, HE Shao-shuai

(Pilot National Laboratory for Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266235, China)

Received: Aug. 12, 2021

Key words: medium altitude long endurance; unmanned aerial vehicle (UAV); marine monitoring platform; multi-task payload; integrated design

Abstract: Based on the CH-4 medium-altitude long-endurance UAV, we designed the load installation, electrical interface, and electromagnetic compatibility, and realized the optimized integration of multitask loads such as a photoelectric pod, sea radar, and AIS. We formed a complete set of marine monitoring platform software and hardware systems through the research on key technologies such as developing long-distance UAV communication, the real-time synchronous return of load data with attitude information, and data processing. Finally, long-term ground tests and long-distance flight tests were conducted in the eastern waters of Sanya, Hainan, and conventional and emergency marine monitoring application modes were investigated based on the application scenario and urgency of the job to validate the platform's design indicators. The platform endurance exceeded 22 h, the operating communication distance exceeded 2300 km, and the imaging accuracies of visible light, infrared, and SAR imaging under uncontrolled conditions were 15.35, 21.09, and 6.30 m, respectively. To summarize, the platform can meet the technical requirements of marine monitoring while also being useful in practice.

(本文编辑: 丛培秀)