

一种基于线阵扫描成像的红外搜索跟踪一体化系统设计

王卫华 黄宗福 何艳 陈曾平

(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室 长沙 410073)

摘要: 分析了红外搜索跟踪系统的特点, 比较了目前广泛采用的几种典型设计方案。针对某地基防空警戒红外系统设计的要求, 提出并实现了一种新的基于线阵扫描成像+伺服周扫的系统设计方案, 重点介绍了其中关键部分实时信息处理分系统的设计实现方法。此设计的特点是能够以低成本的单一系统实现搜索跟踪一体化功能, 既能实现目标的快速全空域 360° 搜索监视, 又能对重点目标实现高精度跟踪测距, 形成目标三维航迹, 使其具备真正的光电雷达功能。外场试验实测数据验证了系统的探测能力。

关键词: 红外搜索跟踪系统; 弱小目标; 目标检测; 实时信息处理

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)09-1312-06

An Incorporate System Design of Infrared Search and Track Based on Line-array-scan Imaging

WANG Wei-hua HUANG Zong-fu HE Yan CHEN Zeng-ping

(ATR Lab, Electronic Science and Engine Institute, NUDT, ChangSha, 410073)

Abstract: The characteristic of the Infrared Search and Track System (IRST) is analyzed, and several typical design methods of IRST that applied broadly at present are compared. For the demand of the ground aerial defense and alertness infrared system design, a new system design method based on line-array-scan imaging and servo circling is proposed. The key part of the realization of the real-time signal process subsystem is explained. The characteristic of the new design method is its capability to realize both searching and tracking in a single system with low cost, it can realize the fast 360° whole airspace searching and target surveillance, and can also precisely track the key target and measure its distance, then come into being the three-dimensional track of the target. The new design provides the system with the genuine function of the optoelectronic radar. The outfield test and the measured data validate the detect capability of the system design.

Key words: IRST; dim small target; target detection; real-time signal process

1 引言

红外搜索跟踪系统(Infrared Search and Track System, IRST)接收目标和背景的红外辐射,通过高速图像信息处理实现目标的实时检测识别,提取目标信息和航迹。其能够实现 360° 全空域目标警戒探测,为 C⁴I 系统提供目标信息或为武器系统提供目标指示。与雷达相比,IRST 具有被动隐蔽、抗电子干扰能力强、高空间分辨率、体积功耗小等诸多优点,能够在复杂战场电磁环境下被动探测识别目标,尤其对雷达难以探测的

低空弱小目标具有其独特的优势,在陆基、海基等各种战场防御目标感知探测系统中有着日益广泛的军事应用。在现代防御体系中,IRST 常与雷达一起构成多层次、多平台、多功能的立体防御网^[1],以满足不断增长的军事需求。

典型的 IRST 系统实现方式有基于线阵的光机周扫系统和基于面阵的分布式孔径系统两种,本文首先分析了这两种典型结构的系统及其优缺点,并介绍了国内一种典型的 IRST 系统设计方案。接下来针对某地基防空警戒红外系统设计的要求,提出并实现一种新

的基于扫描线阵热像仪的周扫系统设计,基于这种新的实现结构介绍了其中的关键实时信息处理系统设计,并基于外场试验实测数据验证了系统的探测能力。此设计方式的优点是能够实现搜索跟踪一体化,既能实现目标的快速全空域 360° 搜索,又能针对重点目标实现目标的高精度跟踪测距,形成目标三维航迹,使其具备真正的光电雷达功能。

2 典型IRST系统分析

用于战场探测的典型IRST应该具备如下的功能:

- 1) 方位 360° 扫描,俯仰基线可调;
- 2) 目标指示更新频率大于1Hz;
- 3) 低虚警率的自动目标检测识别;
- 4) 多目标自动跟踪能力。

下面介绍分析典型IRST系统实现方式及优缺点:

2.1 基于线阵探测器光机 360° 扫描的IRST

基于线阵探测器光机 360° 扫描成像实现IRST系统设计是目前广泛采用的一种方式。典型系统如法国的DIBV-2A VAMPIR MB系统^[2]。其探测器采用4个Sofradir公司的 288×4 长波FPA,光机头扫描速率为 $90\text{r}/\text{min}$,目标指示精度可达 1mrad ,虚警率小于1次/h。在我国,上海技术物理研究所和昆明物理研究所采用 288×4 线阵探测器加光机扫描也实现了类似的系统设计。利用线阵探测器实现红外搜索跟踪存在下列缺点:线阵探测器扫描速率必须和探测器积分时间同步,扫描速率无法实时改变,无法实现目标的自动跟踪,系统光机设计结构复杂。

2.2 基于焦平面探测器的分布式孔径IRST

采用凝视面阵探测器构建IRST系统的主要问题是用一个凝视型FPA覆盖 360° 的水平视场,并有足够的角分辨率非常困难^[3]。随着目前高分辨率红外探测器件技术和高速大容量信息处理技术的提高,采用多个外红焦平面阵列覆盖全空域的分布式孔径系统已成为下一代IRST发展的重要方向^[4]。分布式孔径系统完全取消了扫描机构,能够用单一的系统完成以前要多个单独的专用的红外传感器系统完成的功能,能够获得更高的探测灵敏度和更低的虚警率,能够在搜索和跟踪之间灵活的切换。以美国F-35战机上装备的DAIRS IRST为例,它是一个采用六个红外凝视型焦平面阵列传感器的分布式孔径系统,其功能包含战场态势感知、红外搜索与跟踪、下视红外型目标瞄准指示、杀伤效果评定及导航等。在我国,由于超过 640×512 像元的高分辨率红外焦平面探测器器件技术限制及成本偏高原因,仅有覆盖局部区域的 2×2 、 4×4 子阵

列处于原理样机研究阶段。

2.3 基于焦平面探测器成像+伺服周扫的IRST

南京理工大学采用焦平面阵列探测器结合伺服扫描搜索这样一种新的实现方式构建了一套样机系统^[5],其与一般的IRST系统的主要区别为使用 320×256 的中波制冷焦平面探测器,探测器与光学镜头置于伺服转台做 360° 匀速扫描,实现全方位搜索。此实现方式最大的问题是面阵探测器积分时间过长(ms量级),积分时间内转台运动带来的目标拖尾导致图像目标信噪比下降。以如下情况为例:转台角速度为 ω ,探测器积分时间为 T ,焦平面探测器单像素角分辨率为 α ,静止凝视成像时目标水平方向像素点为 L ,则在探测器运动情况下,目标在水平方向像素点数 N 为:

$$N = L + \omega T / \alpha$$

对于远距离点目标探测, $L = 1$,典型探测器参数如下:对 320×256 阵列,积分时间 $T = 3\text{ms}$,探测器水平方向瞬时视场为 3.6° (对应256像素),则 $\omega = 180^\circ/\text{s}$ 时,单像素点目标被拉伸为39个像素,对应每个像素能量衰减为原来的 $1/39$ 。可见,面阵探测器在运动状态下目标拉伸拖尾导致信噪比下降是相当严重的。图1显示的是中波 320×256 焦平面探测器在转台搜索速度仅为 $60^\circ/\text{s}$ 时,目标图像相对于转台静止时被拉伸信噪比严重下降的情况。虽然作者提出在目标的运动轨迹方向上进行匹配积分能量累积可在一定程度恢复损失的目标能量,但是背景杂波也随之得到累计提高,对目标信噪比的提高不太明显。故对远距离的低信噪比弱小目标探测,相对于转台静止凝视状态,该系统作用距离会大大降低,同时目标拖尾也带来目标指示精度降低。

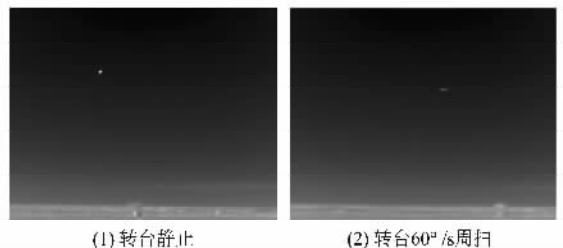


图1 焦平面阵列热像仪在转台静止与运动时目标图像对比

3 基于线阵扫描成像+伺服周扫的IRST系统设计

红外系统设计的依据主要考虑任务、FPA、红外光学系统、体积、尺寸、重量、功耗、价格等8个因素^[3]。这些因素都是互相关联的,系统设计师必须对这些因素进行

正确的折衷和平衡。某地基防空警戒任务要求设计能够由数名单兵野外便携机动展开的轻小型化红外系统,实现全空域警戒搜索多目标监视,并针对重点目标能够生成三维航迹直接引导武器打击。针对上述需求,本文设计了一套新的基于线阵扫描成像+伺服周扫的IRST系统。该系统能够以较低的成本和设计复杂度,满足全空域快速搜索和重点目标跟踪一体化设计要求。

该系统由探测器、两轴转台、伺服控制分系统、实时信息处理分系统、显控台、电池箱及三脚架组成,系统结构如图2所示。探测器由288×4探测器扫描成像FC热像仪和激光测距机组成,热像仪具备双视场($9^\circ \times 6.75^\circ$ 和 $3^\circ \times 2.25^\circ$),在大视场下利用伺服转台快速周扫实现 360° 目标搜索,在小视场下对于重点目标进行伺服闭环跟踪并激光测距,得到目标三维航迹。伺服控制分系统用于系统两轴转台运动控制,实时信息处理分系统实现系统图像目标实时检测识别。探测器、伺服控制分系统、实时信息处理分系统均内置于一体化转台上。显控台提供给系统操作员用于系统的操作控制与信息显示。电池箱用于给系统供电,具备220V市电供电和野外电池供电两种模式。三脚架用于支撑一体化转台,具备水平调平与对瞄寻北标定功能。系统实物照片如图3所示。

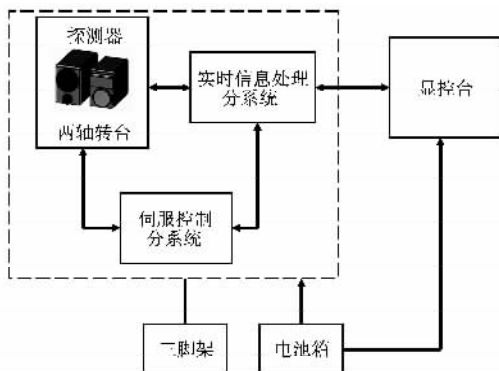


图2 系统结构组成

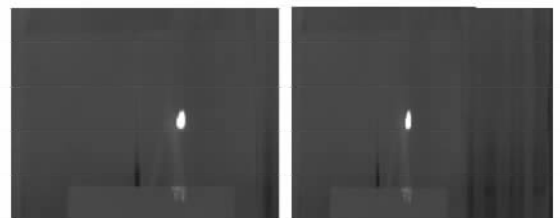


图3 系统实物图片

与其它IRST系统设计对比,该系统设计最大的特点是采用了基于线阵扫描热像仪+伺服周扫的设计,以低成本和低复杂度实现了搜索跟踪一体化设计。采用基于线阵扫描热像仪+伺服周扫的设计的优势在于:

1、克服了传统采用线阵探测器光机扫描方式扫描速率不能实时改变、无法实现目标的闭环跟踪的缺点。能够设定不同速率周扫搜索目标(系统最高周扫速度 $400^\circ/\text{s}$),能够自由设定重点搜索区域,并能以单一系统实现重点目标伺服闭环跟踪测距,形成目标三维航迹,可直接引导武器打击。

2、相对于利用焦平面阵列热像仪+伺服周扫的设计,线阵扫描热像仪探测器相对于焦平面阵列探测器积分时间短(为 μs 量级,焦平面阵列探测器积分时间为 ms 量级),由于探测器运动导致积分时间内的目标拖尾可以基本忽略。对于线阵扫描热像仪,相对于静止状态,转台高速周扫搜索带来热像仪图像的变化在于图像在水平方向整体的压缩,图像压缩的原因是探测器正程扫描时间内转台的运动导致实际视场的扩展。以FC热像仪为例,线阵探测器单帧正程扫描时间为 16ms ,在伺服转台以 $360^\circ/\text{s}$ 周扫时,探测器单帧正程扫描时间内转台运动 5.76° ,再加上单帧探测器正程扫描 9° 视场,此时实际单帧扫描角度为 14.76° 。也就是说,转台静止情况下热像仪图像水平方向768像素对应 9° 视场,而以 $360^\circ/\text{s}$ 周扫时热像仪图像水平方向768像素对应的是 14.76° 视场,这就在图像上表现为在水平方向整体的压缩,如图4所示。



(1) 转台静止 (2) 转台 $360^\circ/\text{s}$ 周扫

图4 线阵扫描热像仪转台静止与运行下目标图像

图像水平方向整体的压缩对远距离弱小目标信杂比的影响基本不大,影响的只是水平方向上的分辨率。因此转台高速周扫基本不影响远距离弱小目标信杂比,这就相对于焦平面阵列+伺服周扫设计能够大大提高系统探测预警距离。

系统具备如下功能和特点:

1、全空域周扫目标搜索,搜索速度可调(最高 $400^\circ/\text{s}$);

2、多目标自动检测编批建航;

3、重点单目标伺服闭环跟踪并激光测距,单目标三维航迹生成;

4、轻小型化设计,能够由3-4名单兵便携机动展开,单件最大重量<30kg(一体化转台),展开时间<10分钟;

5、低功耗设计,野外电池供电工作时间>4小时;

6、扩展有线、无线等多种手段进行目标信息上报。

4 实时信息处理分系统设计

实时信息处理分系统是系统核心部分,通过对来自热像仪的高帧频红外数字图像的实时处理、实现目标实时检测与识别、目标编批建航及输出、伺服闭环控制,向其它部件输出同步信号等功能;同时它作为系统的通信中心,响应或转发来自显控台的命令,接收或转发来自其它分系统的信号。其与各分系统接口关系如图5所示。

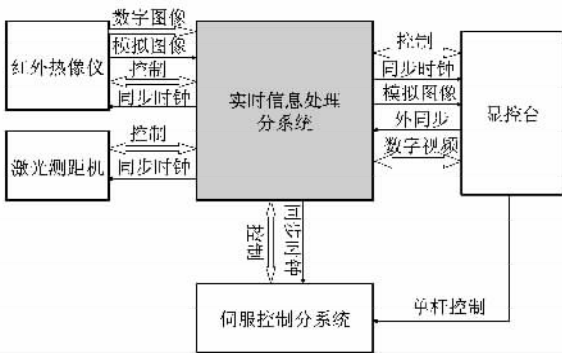


图5 实时信息处理分系统接口关系

4.1 算法设计

实时信息处理算法由目标检测,目标识别,建航编批三个模块组成,如图6所示。下面分别介绍各个模块实现算法:



图6 目标实时信息处理算法流程

一、目标检测模块

在系统以360°/s高速搜索工作模式下,探测器输出图像帧频50Hz,相邻帧间图像平移角度达到7.2°,此时基于帧间相关处理能量累计的算法失效,只能通过单帧处理进行目标检测。基于远距离弱小目标在图像上表现出的局部灰度奇异性特性,我们首先采用一种基于多算子联合滤波背景抑制算法增强目标信杂比^[6],然后基于恒虚警自适应门限分区分割检测目标。

基于多算子联合滤波背景抑制算法的主要思想是

通过选择多种合适的滤波算子对图像进行并行滤波处理,然后对多种算子滤波结果进行融合。该算法的主要优点是可以结合多种背景抑制滤波算法的优点,既能有效增强灰度奇异的目标亮点,又能有效抑制云层起伏以及远缘的干扰;更重要的是,算法便于硬件并行实现。滤波算子的选择需要根据目标的特性,对于远距离的空中目标,目标表现为局部的奇异亮点,目标面积在1×1至5×5像素左右,本系统选择滤波算子为形态学Top-hat滤波算子和Robinson滤波算子并行处理融合。

对于融合滤波背景抑制后的图像,可以近似认为由目标信号、均匀背景信号以及高斯白噪声组成。此时目标检测可采用恒虚警自适应门限算法,判决门限 th 为: $th = u[y(i, j, k)] + k \cdot \sigma_n$ 。其中 $u[y(i, j, k)]$ 为当前帧图像均值, σ_n 为当前帧图像方差, k 为门限系数。本系统在目标检测时对图像采用分区自适应门限方法,对图像以32×32像素大小分区,对每个分区分别单独统计区域内图像均值与方差,计算相应门限进行目标检测,这样可以更加有效检测出弱小目标,防止全局分割时门限不当导致的弱小目标漏检以及虚警过多的问题。

二、目标识别模块

虚警率偏高是局限IRST用于实际战场环境的最大问题,由于在搜索模式下被动探测方式缺乏目标距离信息,飞鸟、云层边缘阳光反射、碎云等在红外图像上都一定程度与目标表现出类似的特征,防空警戒的IRST必须有效识别目标并剔除虚警,才能真正用于实际战场环境。本文根据目标的以下六个特征量的融合判决,实现目标的有效识别和虚警的剔除。

- 1) 目标面积
- 2) 目标长宽比
- 3) 目标局部信杂比
- 4) 目标局部对比度
- 5) 目标高低门限检测面积比
- 6) 目标局部分割占空比

针对各种复杂战场背景条件,通过设定上述六个参数的不同门限,通过判决可有效剔除建筑、云层边缘、低空背景干扰等虚警,初步确认真实目标。在默认条件下,设定目标面积在1×1至5×5像素之间,目标长宽比小于3,目标局部信杂比大于2,局部对比度大于1.1,目标高低门限检测面积比大于0.5,目标局部分割占空比小于30%。

三、建航编批模块

建航编批模块主要实现搜索模式下多目标航迹生成、编批与管理,同时,能够通过目标航迹特性进一步确认目标剔除噪声虚警。在搜索模式下,目标识别模块以 50Hz 速率输出当前视场内目标方位俯仰绝对坐标。由于目标在短时间内帧间具有连续运动的特性,我们根据伺服转台周扫速度的不同,采取不同的航迹关联准则建立目标航迹,实现多目标的目标确认、航迹生成、更新与管理,并根据航迹生成目标批号上报。算法由以下两个主要步骤组成:

(1)航迹建立:基于目标在短时间内帧间近似为匀速直线运动的规律确认目标并建立航迹^[7];

(2)航迹确认:对于所有当前帧输出目标,根据航迹顺延准则确认为目标航迹更新,并结合目标信息生成批号;剩余的目标则根据上述航迹生成准则建立新的航迹。

4.2 硬件设计

实时信息处理分系统处理板硬件采用基于双 DSP+FPGA 的构架设计^{[8][9]},完成 50Hz 图像的实时目标检测、识别、建航处理,并实现与其它分系统的信息交互。其硬件结构与实物照片分别如图 7 和图 8 所示。DSP1 与 DSP2 采用分布式的并行结构,各自拥有独立的外设接口和储存空间。两片 TMS320C6455 构成 DSP 阵列,由串行高速 IO(SRIO)构成 DSP 阵元之间的通信链路。两片 DSP 的 McBSP 通道都连到了 FPGA,作为一种辅助的传输通道。FPGA 构成系统的时序控制中心和数据交换桥梁,完成与其它分系统的数据与命令交互。DSP2 的 I²C 总线连到 ADV7177 上,控制其工作状态,数字视频编码器 ADV7177 合成 PAL 制式叠加波门及目标信息的复合模拟视频信号。

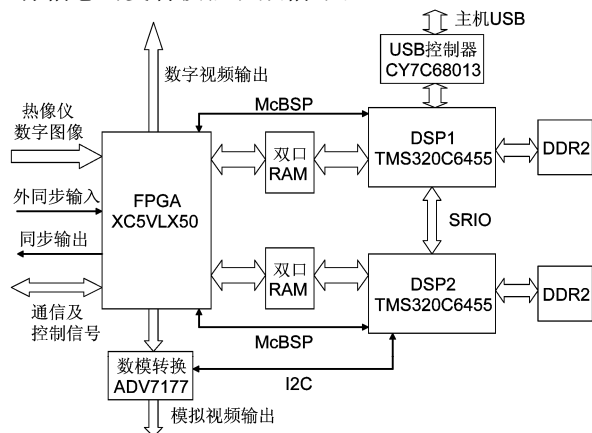


图7 实时信息处理板硬件结构

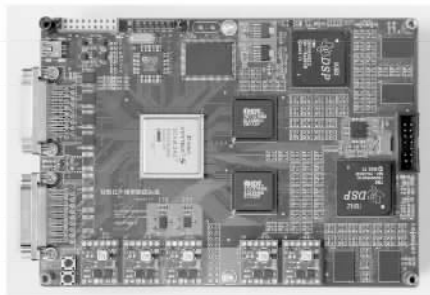


图8 实时信息处理板实物照片

保证目标检测算法实现的实时性是硬件系统设计的一项关键技术。本文研制的实时信息处理板采用 2 片 Texas Instruments 公司 1.0G 主频的定点 DSP TMS320C6455, DSP 之间通过 4x 3.125-Gbps 的 Serial RapidIO 高速串行总线通信。目标检测算法由 FPGA 和两片 DSP 通过流水实现,如图 9 所示,FPGA 实现数字图像的采集及中值滤波处理,DSP1 实现形态学 Top-hat 滤波算子和 Robinson 滤波算子并行背景抑制滤波,DSP2 实现目标识别模块算法与建航编批模块算法。硬件实现时对算法和程序结构进行了一系列优化措施,例如合理安排两个处理器之间的任务规划、针对 DSP 的硬件结构而采用相应的 DSP 内联函数优化 C 代码、充分利用 DSP 高带宽数据搬移的优势采用数据打包处理对存储空间上连续的短字长数据使用宽长度的存储器访问、采用乒乓处理方式高效利用 DSP 小容量的 L2 空间快速处理大容量的图像数据等。经过实际测试,采用我们提出的上述算法,流水处理一帧热像仪 768×288 像素数字图像耗时限制在 16ms 内,完全可以满足系统数字图像 50Hz 帧频处理的要求。



图9 实时处理板算法实现结构

5 小结

针对地基防空警戒轻量化红外搜索跟踪系统的需求,本文提出的基于线阵扫描成像+伺服周扫的IRST 系统实现了搜索跟踪一体化设计,能够以低成本兼顾实现区域防空光电雷达监视功能和直接引导武器系统作战功能。系统工程样机通过了多次外场试验测试,在搜索模式下,对某型号飞机目标迎头探测距离 13km(周扫速度 360°/s),多目标处理能力>

20批,目标指示精度3mrad。在闭环跟踪模式下,目标跟踪距离大于25km,跟踪精度0.3mrad,激光测距测程10km,重频5Hz。同时,系统采用轻型便携式设计和低功耗设计,使得系统能够灵活适用于各种野外作战环境。

参考文献

- [1] 陈华础. 军用红外探测系统的基本要素分析[J]. 现代雷达. 2008, 30(9): 12-15.
- [2] 韩根甲. 舰载红外搜索与跟踪系统的最新现状与发展趋势[J]. 现代防御技术. 2007, 35(3): 109-113.
- [3] 蔡毅. 红外系统中的扫描型和凝视型FPA[J]. 红外技术. 2001, 23(1): 3-7.
- [4] Christophe Grollet, Yves Klein, Vincent Megaidés. ARTEMIS: StaringIRST for the FREMM frigate[J]. SPIE. 2007, 6542(654233): 1-12.
- [5] 管志强, 陈钱, 顾国华等. 红外面阵探测器用于全方位搜索的一种新方法[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 150-155.

- [6] 王卫华, 何艳, 黄宗福等. 一种复杂云层背景红外弱小目标稳健检测算法[J]. 信号处理. 2009, 25(8A): 233-236.
- [7] 韩崇昭, 李晨, 朱洪艳. 红外搜索跟踪系统的数据关联算法研究[J]. 控制与决策. 2008, 23(2): 171-176.
- [8] 李坤. 便携式防空武器红外搜索跟踪系统实时信息处理技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学. 2008.
- [9] 孙刚. 基于双DSP的红外实时信息处理系统关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学. 2009.

作者简介



王卫华(1980-),男,湖北荆州人,国防科技大学精确制导与自动目标识别(ATR)国防科技重点实验室讲师,博士。主要研究方向为红外目标识别。

E-mail: atrwwh@126.com

陈曾平(1967-),男,福建福清人,国防科技大学精确制导与自动目标识别(ATR)国防科技重点实验室教授,博导。主要研究方向为信号处理,目标识别。