

## 美国机载红外测量系统及试验飞机简介

朱良龙

(中国飞行试验研究院,西安 710089)

**摘要:** 目前,美国对军用飞机的红外辐射特性测量主要采用机载红外测量设备按照既定的程序和规范加以测量。对美国现役机载红外测量系统及其试验机情况进行了介绍,重点对美国空军埃格林(Eglin)基地、海军空战中心(NAWC)的机载红外测量系统及技术进行了归纳和描述。

**关键词:** 飞机红外辐射; 红外特征; 机载红外测量吊舱; 红外试验机

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0103-06

## An Introduction to U. S. Airborne IR Measurement Systems and Their Test Aircrafts

ZHU Liang-long

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Currently, the measurement of infrared signatures for U. S. military aircraft is implemented mainly by using airborne infrared pod systems. This paper presents a brief introduction to the U. S. airborne IR measurement systems and their test aircrafts in service, with emphasis on the summary and description of the airborne IR measurement systems at the Eglin AF base and the Navy Air War Center(NAWC).

**Key words:** aircraft IR radiation; IR signature; airborne IR measurement pod; IR test bed

### 0 引言

现代高科技战争是在陆、海、空、天、电子、信息等多维战场空间上的军事对抗,对目标特征的理解与控制是探测与对抗的基础。随着红外技术在武器系统中的广泛应用,新型武器系统设计迫切需要了解飞机的红外辐射特性,对于飞机红外特性的理解与控制,成为影响未来战争任务效能的关键因素。

国外经验表明:目前能精确测定飞机飞行过程中红外辐射特性的唯一方法,是利用机载红外测量设备并按既定程序和规范加以测量<sup>[1]</sup>。长期以来,美国一直非常重视利用各种机载红外测量设施对空中目标进行红外特性测量与研究,其空军、海军均采用机载红外测量平台对战斗机、直升机、红外干扰弹等进行红外特性采集/测量与验模工作,并且开发了多种先进的机载红外测量吊舱,它们主要集中在空军埃格林(Eglin)基地和海军空战中心。其他机构则采用大型飞机作为空中红外测量平台(空中目标光学特性实验室),采集/

测量目标与背景的光学特性。

本文主要针对美国现役的机载红外测量试验设施及其应用进行了归纳和描述。这些机载红外测量系统很多仍属于当今世界最为先进的,并且一直应用于美军对目标和背景的红外测量与评估。

### 1 美国空军埃格林基地的机载红外测量系统简介

美国空军埃格林基地第3246试验联队,在1955~1987年间发展了8套机载红外测量系统,包括波束式导引头鉴定系统(BASES)、超音速红外测量吊舱(SAIMS)、机载红外测量系统(ASIMS)等。这些机载红外系统多数已基本退役,少数还在服役,部分进行了改进或技术升级。至1987年止,这些系统已为一百多项计划采集了红外特性数据,包括大约30项飞机、4项直升飞机、15项加力器、7项无人机、4项牵引靶、28项曳光弹(含烟火类和自燃类)、5项地面目标计划。此外,自AIM-4A导弹计划以来,这些测量系统还为每一项红外导弹的研制试验提供了支持<sup>[1]</sup>。

该基地现役的机载红外测量系统有十几种之多。在2006年的美国政府财政报告中含有这些设备的技

收稿日期:2013-06-03

修回日期:2015-05-21

作者简介:朱良龙(1964—),男,安徽旌德人,高工,研究方向为目标特性测量。

术升级、维护等费用内容描述,表明这些设备仍在使用。下面对这些设备及相关应用情况进行介绍。

### 1.1 超音速机载三自由度常平架红外系统

超音速机载三自由度常平架红外系统(SATIRS)是一种吊舱形式,该吊舱可在 F-15D 飞机外挂。在吊舱头部三轴稳定平台内安装的主要设备有 1 台红外光谱仪、2 台红外辐射计或寻的器、1 台电视摄像机、2 个 AIM-9L/M 导引头等<sup>[2]</sup>。其主要性能指标如下所述。

可见光摄像机:可见光 CCD 相机,型号为 RS-170, 7°视场。

红外热像仪:25 扫描场/s,4:1 隔行扫描,空间分辨率 0.7 mrad;帧频 25 帧/s。其中,短波热像仪波长 1~3 μm,视场 7°×7°;中波热像仪波长 3~5 μm,视场 7°×7°;长波热像仪波长 8~12 μm,视场 7°×7°。针对窄波段测量和各类不同目标,每台热像仪有一个可遥控操作的滤光片和光圈调节机构。

失速扭矩:俯仰 200 ft·lb;方位 360 ft·lb;横滚 75 ft·lb。

回转速率:30 (°)/s。

加速度(满载时):俯仰 456 (°)/s<sup>2</sup>,方位 140 (°)/s<sup>2</sup>,横滚 270 (°)/s<sup>2</sup>。

视角范围:俯仰 ±25°,方位 ±160°,横滚 ±180°。

数字数据采集系统:10 bit/像素的视频数据系统和吊舱辅助数据,VME 实时数据采集,显示系统,IRIG B 时码,28 路机载数字记录器。

电源:直流 28 V;交流 115 V,三相,400 Hz。

尺寸与重量:直径 55.88 cm,长度 4.267 2 m,重量为 567 kg。

### 1.2 波束导引的器鉴定系统

波束导引的器鉴定系统(BASES II)也是一种吊

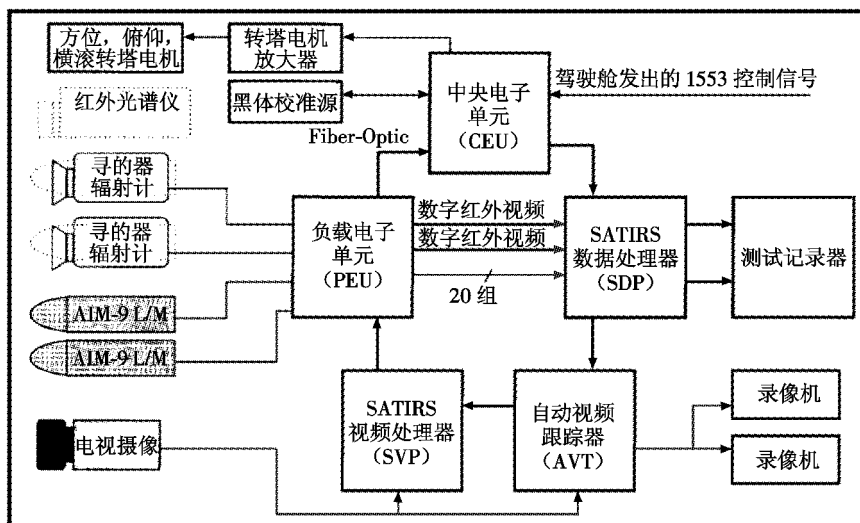
舱形式,该吊舱可在 F-15D 飞机外挂,其直径 55.88 cm,长度 4.267 2 m,重量为 700 kg。在吊舱头部安装的主要设备有三轴、高转矩、惯性稳定陀螺,短波/中波/长波红外热像仪,红外光谱仪,可见光 CCD 摄像机,自动视频跟踪系统,实时数据显示系统,数字数据采集和记录系统等<sup>[3]</sup>。

### 1.3 高分辨率机载成像光谱辐射计系统

该基地现已把最先进的红外成像光谱辐射计安装在机载吊舱内,即高分辨率机载成像光谱辐射计系统(SARIS),用于目标红外特性测量,成像光谱辐射计可以提供目标更全面而细微的特征信息为深入研究目标特性与目标识别带来新的突破。该系统设计是针对现代飞行器的红外特征获取,主要用于测量飞机、火焰和假目标、导弹和火箭的发动机的红外信号,以及各种红外背景和杂波特性,它具有从远距离目标中高精度提取精确红外特征的能力。SARIS 吊舱头部是一个三轴稳定转动架,转动架在 1/25 s 内平稳地转动 0.7 mrad,其光谱仪是在 Bomem MB 干涉仪设计的基础上,前部的光学器件由 3 个镜子(加上 2 块折叠镜)以 5:1 组成非聚焦系统望远镜<sup>[4-5]</sup>。

SARIS 主要技术指标为:光谱范围 2~5 μm;光谱分辨率为 1 cm<sup>-1</sup>,2 cm<sup>-1</sup>,4 cm<sup>-1</sup>或 8 cm<sup>-1</sup>;像素为 16×16;视场角为 16°×16°(±1 mrad);测温范围为 20~1500 °C;数据频率为 19 Hz,38 Hz,75 Hz,150 Hz;数据记录为 240 Mbit/s,连续 30 min;工作温度范围为 -54~71 °C,-54~95 °C;飞行高度为 0~21.335 km;飞行马赫数为 0~1.5<sup>[4-5]</sup>。该系统于 2004 年 10 月由美国空军在 F-15 飞机上飞行试验成功。

美国空军埃格林基地的上述机载红外测量吊舱系统如图 1 所示。



a SATIRS 吊舱系统组成方框图



图1 美国空军埃格林基地的机载红外测量吊舱系统

Fig.1 The airborne IR measurement pod systems of Eglin AFB

### 1.4 机载导引头评价与试验系统

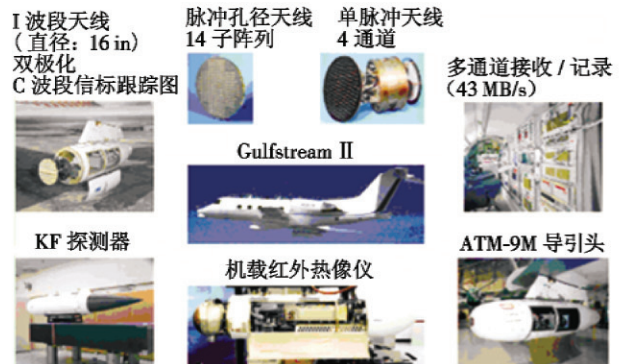
机载导引头评价和试验系统 (ASETS) 是为了研制、测试和评价空对地导引头和传感器的机载平台。ASETS 大概由 10 000 lb 重的设备组成, 包括 16 架控制、显示、电子记录器和非常大的测量转塔。其中, 测量转塔的直径是 50 in (1 in ≈ 2.54 cm), 它是一个 5 轴陀螺稳定万向节系统, 转塔大小超过 7 ft<sup>3</sup> (1 ft = 12 in ≈ 30.5 cm), 内含制导系统、3 ~ 5 μm 和 8 ~ 12 μm 红外热像仪、红外图像系统、激光系统、95 GHz 雷达单元、电视视频相机和激光测距仪等。ASETS 的任务主要是空对地导引头测试、地形图、表面目标测量、空空测试、大气传输研究、气候数据收集、飞机或导弹袭击测试、背景特性测试和监视等<sup>[6]</sup>, ASETS 的载机是一架 NC-130A 飞机。

### 1.5 机载导引头试验平台

机载导引头试验平台 (ASTB) 是由 Gulfstream II 飞机改装而成, 用于目标特征信息采集与导引头性能评估等飞行试验。Gulfstream II 飞机平台上携带了各种各样的探测器吊舱, 如 RF 探测器、ACMI 吊舱、机载红外图像 (AIRI) 系统、红外导引头性能评估吊舱、AIM-9M 导引头、X 波段射频导引头以及 C 波段烟火跟踪器等, 飞机上部安有单脉冲天线、高频天线、甚高频天线、GPS 天线、超高频 L 波段天线等高级阵列天线。其中, AIRI 系统是一个安装在机翼上的跟踪系统, 主要用于目标特性研究和检测算法的评估, 其光学系统的核心是两个红外热像仪, 一个是 2 ~ 5 μm 的 256 × 256 像素的 InSb 焦平面阵列, 另一个是 6 ~ 10 μm 的 128 × 128 像素的 HgCdTe 焦平面阵列。1990 年 3 月, ASTB 系统进行了首次飞行, 此后该系统进行了 550 多次飞行, 收集了许多目标红外和雷达数据<sup>[7-8]</sup>。图 2 所示为 Gulfstream II 机载导引头试验平台及部分设备<sup>[7-8]</sup>。



a Gulfstream II 机载导引头试验平台



b Gulfstream II 机载导引头试验平台的部分设备

图2 Gulfstream II 机载导引头试验平台及设备

Fig.2 Gulfstream II airborne seeker test bed and the devices

该基地的其他机载红外测量系统还有: 机载光谱红外测量系统 (ASIMS), 机载光电/红外/激光系统 (AEIL) II, 通用测量吊舱 (CSMP), 遥感机载辐射计吊舱 (STAR), 机载光电仪器稳定平台 (SEAIP) 等。

## 2 美国海军空战中心机载红外测量系统简介

美国海军空战中心 (NAWC) 研制了 4 套机载红外测量系统, 分别命名为机载转塔式红外测量系统 (ATIMS) I、II、III 和 IV, 也称 Tiger 红外测量吊舱。

### 2.1 机载转塔式红外测量系统 II

机载转塔式红外测量系统 (ATIMS) II 可装备在 F-4, F-15D 机翼上或 A-3 飞机上, 于 1979 年启用, 该系统

包含的光学测量设备有红外热像仪、红外光谱仪、2台电视摄像机、4个制导系统。红外测量仪器和彩色电视摄像机装在球形转塔内,导弹制导系统固定在球形四周<sup>[9]</sup>。该系统最初用于空对空测量飞机、导弹和干扰系统的红外特征测量,后来主要用于复杂干扰环境下试验制导系统,可在超音速环境下工作,吊舱在载机上可向前或向后安装,制导系统与测量系统的数据同时显示在屏幕上,并记录下来,在试验制导系统跟踪能力的同时记录目标的红外特性<sup>[9]</sup>。测量的典型几何关系如图3所示。

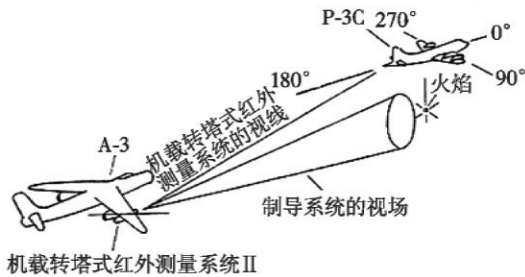


图3 对曳光弹测量的典型几何关系

Fig.3 Typical geometry for stern aspect flare measurement

## 2.2 机载转塔式红外测量系统 III

机载转塔式红外测量系统(ATIMS) III 装备在 QF-4 飞机上,系统包含的光学测量设备及数据采集系统有:1台红外光谱辐射计( $1.7 \sim 5.3 \mu\text{m}$ ),1个红外辐射计,4台视频相机,1台激光测距仪,2个红外热像仪( $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ,  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ),5个 VHS 格式的视频盒记录器,以及来自个体试验客户必不可少的多达4枚导引头。在 QF-4 后座舱的飞行试验工程师,可借助于一个小的电视显示器上的视频和图像显示未操作转塔。在事后数据分析期间,窄视场、宽视场和 ATMS 图像均由时间相关联<sup>[10]</sup>。

机载转塔式红外测量系统 III 应用于红外干扰弹测量的例子:一架海军空战中心的 WPNS QF-4 飞机,外挂机载转塔式红外测量系统 III,与试验机编队飞行,并捕获曳光弹相对于 B-1B 飞行试验机 X 坐标位置数据。为了捕获曳光弹轨迹数据, QF-4 飞机与 B-1B 飞机以相同的飞行姿态,从 B-1B 飞机后部飞行至 B-1B 飞机的右翼, B-1B 自卫系统操作人员在指定的飞行马赫数和高度使用曳光弹,飞行状态是从 1.70 马赫数/20000 ft 到 0.95 马赫数/3000 ft。

## 2.3 机载转塔式红外测量系统 IV

机载转塔式红外测量系统(ATIMS) IV 吊舱头部装有3排光学传感器,仅中间1排就安装了5个光学传感器,该头部至少装有11个光学测量设备,包括  $3.5 \sim 5 \mu\text{m}$  和  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  红外波段的测量设备<sup>[9]</sup>。

1998年5月,美国海军空战中心采用 ATIMS IV 吊

舱对 F-15E 飞机进行了空中红外特征测量飞行试验<sup>[11]</sup>。美国对 F-22 飞机红外特征空中飞行测量是在 1998 年 10 月~12 月进行的,用 ATIMS 吊舱对全部的 3 架 F-22 验证机进行了为期 4 个月的红外特征测量飞行试验。

2000 年 7 月,美国用爱德华空军基地的 F-15B 飞机外挂 ATIMS IV,对 F/A-22 飞机的 4002 号进行了 13 架次红外测量飞行试验,获得了大约 17 h 的动态红外特性数据。这次试验主要是用于对 F/A-22 飞机高保真红外辐射模型进行验证,测试地点在美国海军空战中心武器分部海洋测试靶场。该吊舱在持续的超音速状态下对应很宽的水平/高低视角范围,能同时获得 4 个波段的高动态范围红外校准数字视频信息;进行了 1.5 马赫数/12 km 和 0.9 马赫数/9 km 两种马赫数/高度的红外测量<sup>[12]</sup>。图 4 所示为 F-15B 外挂 ATIMS IV 吊舱对 F/A-22 进行空中红外特性测量飞行试验<sup>[12]</sup>。



图4 F-15B 外挂 ATIMS IV 吊舱对 F/A-22 进行空中动态红外测量飞行试验

Fig.4 F-15B ATIMS IV pod performing IR measurement of F/A-22

在测量中, F/A-22 飞机的垂直右尾上粘贴了一块类似黑体的标准参考辐射源,用以检查红外热像仪的漂动,并且每隔 15 min 检查一次。这种空中实时对红外测量仪器进行定标的方法可较好地提高动态测量精度<sup>[12]</sup>。验证的红外模型可以预测从  $0.4 \sim 25 \mu\text{m}$  范围内的飞机红外特性,并输出红外图像、光谱和波段内红外辐射强度。通过 F/A-22 飞机红外特性飞行测试,获得了一组相关条件下高质量的校准后的红外图像。一个高保真的 F/A-22 红外特性模型的精确度,通过本次高质量的飞行红外测试数据进行了严格的定量验证<sup>[12]</sup>。

2000 年,美国海军用 F-4 飞机外挂 ATIMS IV,对 MV-22 直升机进行了空对空红外特性测量,如图 5a 所示。从图 5a 中可以看出, ATIMS IV 是反向挂载在 F-4 飞机的机翼上的,这是为了对目标机进行前向红外特性测量。2003 年后,为了能采集、测量目标更多的光学特性,提高飞行测量效率,爱德华空军基地在 F-15D 飞机上同时外挂 ATIMS III 和 IV 两个红外测量吊舱,如图 5b 所示。这样,两个吊舱的各类光学测量传感器至少在 20 个以上,所采集、获取的目标特征信息量非常多,飞行测量效率很高。



图5 机载转塔式红外测量系统的应用

Fig. 5 The applications of airborne turret infrared measurement systems

### 3 美国红外测量试验飞机简介

#### 3.1 飞行红外特征技术试验机

美国空军专门改装了一架 NKC-135 飞机作为专门收集目标与背景红外特征的试验机,命名为飞行红外特征技术试验机(Flying Infrared Signature Technology Aircraft, FISTA),它为美国国防部对感兴趣的目标和背景进行机载测量。

FISTA 始于 1961 年,最初检验了大气核爆炸和相关夜空、极光的红外特性。1974 年禁止核试验协定后,FISTA 转向了测量和推测飞行器的红外特性,在大气红外窗口用空中平台探测和辨认飞行器,为飞机提供定标红外测量,目的是掌握飞机目标特征现象,这些数据是目标和背景光谱、带通辐射成像数据库的基础。在其服役 32 年之后,美国于 1993 年 9 月对其进行了改进,FISTA I 退役后,FISTA 测量设备转换到了新型的 NKC-135E 飞机上,在机上开了 20 个设备窗口,改进后的试验机称为 FISTA II,如图 6a 所示,并于 1995 年 5 月成功试飞<sup>[11-13]</sup>。FISTA II 试验机上安装的设备包括 8 个红外热像仪、3 个干涉光谱仪、2 个辐射计、2 台 CCD 电视和 2 台照相机,覆盖了所有感兴趣的红外线波长,另外还有摄像机、照相机设备等提供背景、外貌及距离等信息<sup>[11-13]</sup>。

FISTA 提供了大量的飞行器、导弹、其他面目标和广阔背景测量的光谱、辐射空间分布等数据,包括一些 F-16 飞机的红外新数据,并可继续进行红外低可探测技术研究(如 B-2 和 F-117 计划),也可继续提供新型飞行器如 F-22 飞机的红外数据<sup>[11-13]</sup>。FISTA 也为目标和背景光谱、红外图像数据库提供了大量的数据,并通过所获得的测量数据建立和校验目标红外辐射模型,使其可以

较准确地描述和预测飞行器典型红外特性。FISTA II 提供了先进的探测飞行器和其他美国国防部所关注目标的红外特征测量能力,为新设计的红外隐身技术测试及更低可探测性能的涂层测试提供了支撑,为空军设计红外低可探测的飞行器提供了验证能力。FISTA 的测量方法广泛用于识别和验证国防部的特征代码,如目标和背景的红外光谱和图像代码等<sup>[11-13]</sup>。

FISTA 飞行测量非常频繁,获取了大量的目标与背景数据。除了军用目标与背景的红外测量外,FISTA 还用于天体、大气与陆地和海洋物理研究等,涉及的研究内容非常广泛。

#### 3.2 NASA ER-2 机载红外测量试验机

美国国家航空和宇宙航行局(NASA)将一架 ER-2 飞机改装作为红外测量试验机,机上各类红外测量设备大约有 35 种之多,所有的设备都要进行光谱、空间和光谱辐射度的定标。飞机上安装有导航系统,可以连续记录 GPS 位置和平台姿态数据<sup>[9]</sup>,试验机如图 6b 所示。

#### 3.3 NASA DC-8 机载红外测量试验机

NASA 又将一架 DC-8 飞机改装作为红外测量试验机。在 DC-8 飞机上开有 10 个 3 in × 15 in 的平面窗,在圆顶上开有一个天顶口,共安装了 13 台光学特性测量设备<sup>[9]</sup>,试验机如图 6c 所示。

#### 3.4 爱德华空军基地波音 707 红外测量试验机

爱德华空军基地将一架波音 707 飞机改装作为红外测量试验机。在波音 707 飞机上开了 4 个光学窗口,安装了光谱仪、热像仪、紫外辐射计、可见光成像光谱仪等测量设备<sup>[9]</sup>,试验机如图 6d 所示。

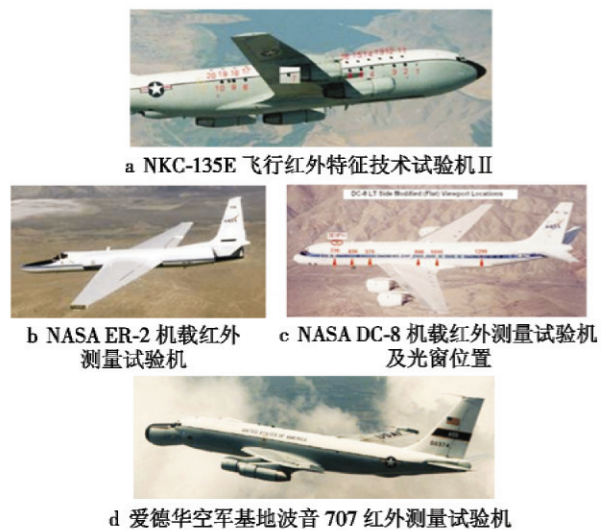


图6 红外测量试验机

Fig. 6 IR measurement test aircrafts

### 4 结束语

本文重点介绍了美国空军埃格林基地、海军空战

中心以及其他机构在役的机载红外测量系统或试验设施与应用。迄今为止,这些机载红外测量系统很多仍属于当今世界最为先进的。

美国一直致力于对飞机性能,包括隐身性能和生存力在内进行彻底的红外评估。除了上述机载红外测量系统及试验设施以外,近年又投入使用了支持海军所有机载红外测试要求的 CASS 机载红外定标系统和 AN/AAM-60(V)机载红外试验系统,并在沃罗普飞行研究院(WFF)机场与空域进行目标的红外测试飞行试验,红外测试中使用了高分辨率的红外热像仪和光谱测量系统,获取用来建立飞机特定点的目标特性分析与识别所需的详细飞机红外特性/温度数据,提供飞机红外特性/威胁评估所需的高分辨率图像数据和光谱数据等。

### 参 考 文 献

- [1] KULL W G,李明. 机载红外测量系统与技术[J]. 飞行器测控技术,1992(3):36-45. (KULL W G, LI M. Airborne IR measurement system and technology[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 1992(3):36-45.)
- [2] SOUTHERN RESEARCH. Engineering, systems development; Super-sonic Airborne Tri-gimbal InfraRed System (SATIRS) [Z].
- [3] SOUTHERN RESEARCH. Engineering, systems development; Beam approach seeker evaluation system[Z].
- [4] BURTON M M, CRUGER W E, GITTINS C, et al. Real-time sensor mapping display for airborne imaging sensor test with the Adaptive Infrared Imaging Spectroradiometer (AIRIS) [C]//Chemical and Biological Standoff Detection III, SPIE, 2005. doi:10.1117/12.630607.
- [5] VILLEMAIRE A J, FORTIN S, LAFOND C, et al. High resolution airborne imaging spectrometer [C]//Infrared Technology and Applications XXIV, SPIE, 1998. doi:10.1117/12.328001.
- [6] JOLLIE W B. Airborne seeker evaluation and test system [C]//Acquisition, Tracking, and Pointing V, SPIE 1991. doi:10.1117/12.45687.
- [7] DOYLE K B, CERRATI V J, FORMAN S E, et al. Optimal structural design of the airborne infrared imager [C]//Optomechanical and Precision Instrument Design, SPIE, 1995: 11-12.
- [8] UPTON L O, THURMAN L A. Radars for the detection and tracking of cruise missiles [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2):27-30.
- [9] 朱良龙,周娜. 美国空军、海军机载红外测量系统与光电试验设施简介[J]. 国外目标与环境特性管理与技术研究参考,2007(11):13-15. (ZHU L L, ZHOU N. An introduction to airborne IR measurement system and EO test devices of U. S. Navy and Air Force [J]. Reference of Foreign Target and Environment Management, 2007(11): 13-15.)
- [10] KREISS W T. Model for IR sensor performance evaluation: Applications and results [C]//Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modelings, and Testing, SPIE, 1990. doi:10.1117/12.21771.
- [11] KRISD J A. IR field measurements from the FISTA aircraft calibration, data reduction, and development of IR signature models, AFRL-VS-TR-1999-1524 [Z].
- [12] CLINE J, Dr BEHM D. F/A-22 IR signature flight test model validation [J]. Aircraft Survivability, 2003(3):9-12.
- [13] SANDFORD B P, SCHUMMERS J H. New fista measurement platform [Z].

## 下 期 要 目

Linux 下 GNSS 中频信号采集系统及接收机设计  
一种鲁棒闭环的增量式 Graph SLAM 算法  
基于马尔科夫决策理论的无人机视情维修策略  
面向区域的 GEO 红外预警卫星部署研究  
基于备件短缺数的舰载机修理级别分析  
激光引信云雾散射回波的近似算法与应用分析  
一种基于道路约束的变结构多模型跟踪算法

量子粒子群算法在地磁匹配航迹规划中的应用  
基于天底点的二相编码解调算法及实现  
一种机载 MIMO 雷达降维 STAP 快速算法  
基于 ADS-B 的低空飞行航迹预测  
飞行器姿态对 GPS 信号仿真的影响分析  
基于阵列技术的 MEMS 陀螺温度补偿方法  
软件健康管理在 ADIRU 中的应用及验证