

新一代机载红外搜索跟踪系统技术发展分析

杨百剑, 万欣

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:机载红外搜索跟踪(IRST)系统的发展必须要适应未来战斗机发展的需要。本文从未来战机对机载传感器系统的需求入手,在认真分析机载IRST系统的发展历程和现有技术基础上,提出了新一代机载IRST系统的技术发展思路。为机载IRST系统的发展提供参考。

关键词:IRST系统;探测距离;反应时间;隐身性能

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.09.004

New generation of IRST technology in plane development

YANG Bai-jian, WAN Xin

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract:The airborne IR search and tracking system(IRST) must be developed in accord with the demand of the future airplane. This paper firstly introduces the requirements of the IR sensor system which will be equipped on the fourth generation airplane. Development of IRST system and existing technology are also introduced. Then suggestion for developing new IRST system is put forward.

Key words:IRST system; detection range; responding time; stealth performance

1 引言

机载红外搜索跟踪系统经过30多年的研究,随着对有关目标、背景特性认知程度的增加,以及光电传感器、电子线路和高速DSP的快速发展和有关算法的改进,各种产品陆续投入使用,并呈现出良好的发展前景。尤其是利用红外被动探测的特点,在强电子对抗的条件下,对无人机、隐身飞机、巡航弹、弹道导弹等有较强探测、识别能力,机载红外搜索跟踪系统已经逐步成为战斗机必然配置的传感器。

随着美国F-22“猛禽”战斗机的问世,西方多国联合研制的F-35“联合攻击机”的研制成功,世界战斗机已进入了第四代(俄罗斯称为第五代)。第四代战斗机不仅强调攻击能力的提升,同时还注重机动性能,隐身性能的提高。为适应第四代战斗机综合性能的提高,机载红外搜索跟踪系统也需要相应进行创新性设计。本文将依据光电技术发展的技术基础,分析新一代机载红外搜索跟踪系统的技术发展方向。

2 机载IRST系统发展历程

最早的机载红外搜索跟踪系统是美国在20世

纪60年代为F-4B飞机研制的红外搜索跟踪装置,采用单元硫化铅(PbS)作为光敏元件,接收飞机发动机尾喷口及蒙皮的红外温度,工作波长为 $3.0 \sim 4.5 \mu\text{m}$;搜索范围为水平方向 $\pm 60^\circ$,俯仰方向 $\pm 60^\circ$;探测距离为30 km;质量为18 kg;长度为56 cm;口径为20 cm。

1991年的海湾战争成为机载红外探测系统崭露头角的试验场,红外系统的作用在这场战争中发挥得淋漓尽致,正是这场战争的启示,此后几年,世界各国陆续开始展开机载IRST系统和FLIR(红外前视)系统的研制。IRST系统主要以对空作战为主,FLIR主要用于对地探测。

经过这些年的发展,机载IRST系统已由最初的单元传感器发展为线阵、面阵传感器。系统探测距离也逐步提高,由20~30 km提高到50~60 km,有的甚至更远些。世界各国主要机载IRST系统及性

作者简介:杨百剑(1979-)男,工程师,从事光电系统设备研究工作。E-mail:yey328@sina.com

收稿日期:2011-06-28;修订日期:2011-07-01

能如表1所示^[1]。

表1 机载空/空型IRST的主要性能参数

名称	PIRATE	AN/AWG-9	TJ1热定向器
研制公司	欧洲四国	美国休斯飞机公司	俄自动化设计局
光敏元件	凝视型CMT	8元线列碲化钢	64元线列碲化钢
工作波段	8~12 μm	3.5~4.8 μm	3~5 μm
探测部位	全方位探测	全方位探测	全方位探测
搜索范围	方位: ±60° 俯仰: ±15°	方位: ±65° 俯仰: 59° ~ -80°	方位: ±30° 俯仰: ±30°
探测距离	迎头 74 km	低空迎头 24 km 高空尾后 190 km	尾后 25~30 km
重量	40 kg	30 kg	68 kg
配装机种	欧洲战斗机	F-14A	Su-27, MIG-29

目前已有的机载IRST系统,按照系统设计所采用的红外探测器、光电总体技术等特点,将已有的机载红外搜索跟踪系统分为三代。第一代,即采用单元或多元传感器实现的红外搜索跟踪系统;第二代,发展为线阵TDI型传感器搜索跟踪系统;第三代,发展为长线阵传感器系统。现役装备最多的是采用288*4型探测器和480*6型探测器实现的机载IRST系统。

机载IRST系统安装形式主要有:吊舱和座舱前半埋式两种。窗口主要分为两种:球形头罩和楔形平板头罩。

3 新一代机载IRST系统

3.1 新一代机载IRST系统的要求

为适应未来战斗机“先敌发现、先敌瞄准、先敌开火、先敌摧毁”的战技要求,同时满足飞机对气动性能、隐身性能的要求,机载传感器系统也必须满足相应的要求。对于机载IRST系统而言,主要有:

(1) 兼顾提升探测距离与提高系统搜索频率

更远的探测距离和更快的搜索速度是先敌发现的先决条件。空空作战,战斗机本身的速度都很快,要保证能先敌发现,第一必须要能看得远;第二还要搜索快。

(2) 提高响应速度

先敌瞄准,就是在发现敌方时,能立即从快速搜索转入跟踪状态,即缩短系统反应时间。系统工作状态的快速转换,跟系统转动惯量相关。转动惯量越大,转换时间越长;提高系统响应速度,最主要的目标即是降低系统转动惯量。系统转动惯量大小与系统扫描机构方式有关。开发更先进的搜索扫描方式是研究的重点。

(3) 多传感器综合,多功能集成

机载系统追求体积小、质量轻、功能强。对于机载IRST系统一是希望采用中、长波双波段探测、结合激光测距能实现目标定位;同时在系统功能上,希望能兼顾IRST功能和FLIR功能。一套系统既能满足空空作战,又能满足对地攻击探测^[2]。

(4) 与飞机共形设计,减小对飞机气动性能的影响

为适合现代高科技战争的环境要求,“高机动性能”是第四代战斗机的一个主要性能指标。高机动性能,这一要求基本否定了吊舱形式的挂载方式。最好的选择就是IRST系统参与飞机外形设计,在总体外形上包括系统结构、光学窗口以及安装方式与飞机的外形匹配起来,既保证IRST系统工作性能,又不影响飞机气动性能。

(5) 低RCS光学窗口

“先进的隐身性能”是第四代战机的一个核心指标。第四代战机也称为“隐身飞机”,在飞机整机都在努力降低RCS时,IRST系统的光学窗口使用不当将严重破坏整机的RCS性能。目前主要采用平板拼接异形窗口形式,并在窗口上镀导电膜是技术发展方向^[3]。

3.2 新一代机载IRST系统的发展思路

为适应新的需求,必须采用新的设计思路。中国现有IRST技术起源于从苏联引进的OEPS-27光电雷达系统技术。虽然随着技术的发展,国内已经在该技术上有了进一步提高,但总体仍采用OEPS-27技术。该技术具有其独特的优势,如系统结构简单,灵活,体积小、质量轻,改进后的系统作用距离得到提升等,但其固有缺陷将影响其在未来战机上的使用。

(1) 静态指标高,实际动态指标差

采用TDI型探测器,要求相对严格的扫描速度匀速性。扫描速度匀速性要求为:

$$M \frac{\Delta\nu}{\nu} \leq 20\% \quad (1)$$

式中, M 为探测器的积分等级; $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ 为扫描速度相对误差。

$$\text{对于 } 288 * 4 \text{ 型探测器, } M = 11; \frac{\Delta\nu}{\nu} \leq 1.82\%;$$

$$\text{对于 } 480 * 6 \text{ 型探测器, } M = 16; \frac{\Delta\nu}{\nu} \leq 1.25\%$$

探测器积分是相对成像对象而言的,因此扫描速度也是相对于成像对象;也就是说,扫描速度是相对于大地坐标系的,不是相对平台的。在静态情况下,获得这样的相对大地的匀速性是不难的;而在动态

情况下,因为飞机运动和姿态变化的影响,这样的匀速性要求就相对较高。因此,处理不好,机载环境条件下,TDI型器件的优势很难发挥出来。

(2) 搜索空域内不同方向作用距离不同

OEPS-27系统采用一片反射镜低头运动实现俯仰搜索,图1示意了这种运动过程,从图上可知,不同角度情况下,反射镜有效通光口径不同,导致不同高度角时,系统作用距离不同。系统作用距离与角度余弦值成正比。 45° 角时最大,其他均减小。这也是为什么该系统俯仰搜索范围受限制的原因。

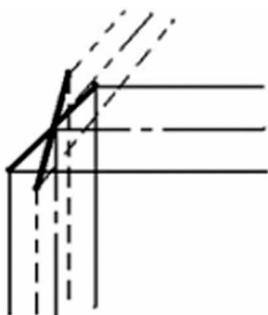


图1 反射镜扫描示意图

(3) 系统反应时间长,不能满足快速瞄准的要求

TDI型器件成像,必须通过一维的机械扫描,搜索时通过机构扫描实现搜索;转入跟踪时,系统扫描组件转入跟踪状态,此时得通过另一套扫描机构实现小视场范围的扫描成像。在系统工作时,必伴随着两套机构的运动实现状态转换。其反应时间相对较长,不能满足快速跟踪瞄准的要求。

(4) 球形窗口,不利于雷达隐身

OEPS-27系统采用球形窗口如图2所示,该形状是不利于机身雷达隐身设计的;当然,经过长时间的研究,科学家通过在窗口上镀金属导电膜来降低窗口RCS,但这又将严重影响系统的光学效率,降低了系统性能指标。



图2 球形光学窗口

新一代机载IRST系统必须在这些问题上得到改进。

随着红外探测器技术的发展,凝视焦平面器件已经得到成熟应用。新一代红外搜索跟踪系统将用凝视焦平面器件取代线阵器件作为主要传感器。

根据红外系统的特点,在探测器一定的情况下,提高作用距离需采用更长焦距的光学系统,光学系统焦距长,系统视场小,系统的搜索速率就会

受到限制。一般情况下,系统作用距离与系统焦距成正比,系统搜索频率与焦距的平方成反比。要同时提高探测距离,和搜索频率,需要新的思路和方法。TDI型探测器,因为需要匹配积分,系统扫描速度与系统焦距(瞬时视场)相关,且只能稳定匀速。否则积分将匹配不上,导致图像模糊。采用凝视型探测器,没有扫描积分的限制,在解决器件积分过程中探测元与景物相对静止的问题后,扫描速度可以任意调整,且最大速度只跟探测器视场和帧频有关。

采用凝视型器件系统搜索周期理论公式:

$$T = \frac{1}{f_{\text{帧}}} \times \frac{A \times B}{a \times b \times N \times W \times (1 - \eta)} f^2 \quad (2)$$

式中, a, b 为探测器尺寸; $N \times W$ 为探测器像元数; f 为焦距; A, B 为搜索空域方位、俯仰角度范围; η 为相邻两帧重叠率; $f_{\text{帧}}$ 为红外系统成像帧频。

第一,通过提高探测器帧频和扩大探测器阵列规模均能有效提高系统扫描频率。

第二,改进光学搜索扫描方式,采用二维光学旋转扫描方式,实现球形 4π 空间搜索,保证系统在搜索区域内的光学效率相等。

第三,采用光学消像旋技术,保证系统搜索跟踪过程中其传感器始终保持固定状态,减小系统运动负载,从而提高系统响应速度。

第四,采用平板拼接异形的光学窗口形式,并与飞机机体共形设计,如图3所示。将系统大部分结构埋在机体内,仅留扫描光学部件在外部,并由光学窗口保护。



图3 平板拼接异形窗口

3.3 新一代机载IRST系统的关键技术

为实现上述新一代机载IRST系统,主要需要攻克的关键技术有:

(1) 凝视型焦平面器件在快速扫描状态下清晰成像的技术研究

凝视型焦平面器件积分时间比TDI型器件还长,在高速扫描状态下,也会导致图像模糊;为保证图像质量,必须采用相应的消像移技术,即保证探测器在积分时间(曝光时间)内景物所成像与焦面没有相对移动。如图4所示,图4(a)是高速扫描下没有像移补偿的成像效果,图4(b)是采用了像移补偿

技术的成像效果。可见,采用了像移补偿技术,高速扫描状态下,与静止成像质量没有明显差别。



(a) 没有像移补偿的效果 (b) 有像移补偿的效果

图4 凝视型器件高速扫描成像像移补偿效果

(2) 新型扫描结构的研究

为了实现系统俯仰方向作用距离不受角度影响,扩大俯仰搜索范围,必须重新考虑新的搜索方式。而且新的搜索方式不能牺牲其他方面的性能和要求。美国人在 F-35 EOTS 系统上就采用了新型的结构方式,如图 5 所示^[4]。该结构体制保证了系统在扫描过程中光学效率不发生变化;同时旋转扫描过程中没有角度死区,可以实现全空域扫描。



图5 新型扫描结构图

(3) 高强度、低 RCS 光学窗口设计

采用平板拼接型窗口,且与飞机共形设计,既有利于改善飞机整体的气动性能,又符合隐身飞机对表面的处理要求,也不影响光学系统参数,有利于系统整体设计;并且不会因为外界气动压力形变导致光学系统参数的变化,影响成像质量。

采用平板拼接窗口是未来的发展趋势,但是也面临很多问题,最主要的问题就是窗口材料选择问题。不仅要满足系统内不同光学波段的高透过率性,还要保证有高强度性要求。目前可供选择的材料不多,即使有些材料在硬度和透过率上满足要求,但制备工艺还不完善,一是没有可适用的外形尺寸;二是加工工艺不够完备,不能保证加工精度要求。

(4) 多波段传感器光学共光路设计

高度集成、高度综合是未来机载装备发展的趋

势。将多个光电传感器集成在一个系统中,同时兼顾多种工作模式是新一代 IRST 系统追求的目标。在系统设计中,首先考虑红外与激光的集成化设计,必然要求系统光学上实现共光路设计;中波红外与长波红外共光路设计,充分利用红外的光谱信息,提高系统目标探测率和识别率;同时增加目标定位能力,为火控系统提供数据支持;在激光波段上综合激光测距、激光照射和激光光斑跟踪功能;实现同一套系统可兼顾空对空搜索跟踪功能,也可兼顾对地 FLIR 功能^[5]。

(5) 高性能信号处理技术

高性能信号处理技术是机载 IRST 系统永远追求的目标。信号处理技术的持续改进可以进一步有效提高系统性能。

4 总结

第四代战斗机已经成为世界各国竞相发展的武器装备。相应的机载传感器系统也需要相适应发展。根据第四代战机“先敌发现、先敌瞄准、先敌开火、先敌摧毁”的战术要求,本文结合光电探测技术的发展基础,提出的新一代机载 IRST 系统技术发展主要方向主要包括探测器的选择、扫描机构的设计、窗口的设计以及系统光学的设计等,希望能为未来的机载 IRST 系统发展提供参考。

参考文献:

- [1] Sun B S. The fighter targeting pod new progress[J]. International Aviation, 2002, (8): 60-62. (in Chinese)
孙滨生. 战斗机瞄准吊舱的新进展[J]. 国际航空, 2002, (8): 60-62.
- [2] Chen D H, Qin Z Y. Integrated sensors in fighter[J]. International Aviation, 2002, (6): 37-47. (in Chinese)
陈德煌, 秦智勇. 战斗机传感器进一步综合化[J]. 国际航空, 2002, (6): 37-47.
- [3] Audrey Chang, Craig Curtis. Optical segmented RF signature managed window united states: US, 7560050 [P], 2003.
- [4] Thanh X Luu, Seung C Sohn. Low profile optical imaging system having a wide field of regard united states: US, 6878923 [P], 2005.
- [5] Bai X F, Liang Y H, Jiang W J. Key techniques and prospects of infrared search and tracking systems[J]. Defense Technology, 2007, (1): 34-36. (in Chinese)
白学福, 梁永辉, 江文杰. 红外搜索跟踪系统的关键技术和发展前景[J]. 国防科技, 2007, (1): 34-36.