

99-GD-01

全国光电技术学术交流会
论文集

1999年10月 昆明

全国光电技术学术交流会 论文集

会议主办单位: 中国航天工业总公司 8358 研究所

会议筹办单位: 中国航天工业总公司 8358 研究所

中国航天工业总公司 508 研究所

华中理工大学

中国航天工业总公司二院总体设计部

哈尔滨工业大学

《红外与激光工程》编辑部 编辑出版

目 录

(带★的文章为特邀报告)

系统总体设计

1. 第二代红外成像系统-----杨应槐(1)
2. 分布孔径红外系统的研究现状及其展望-----范晋祥(6)
3. EOMS靶场光测设备总体技术研究-----刘顺发 马振洲(13)
4. ★层次分析法在红外成像制导指标体系研究中的应用-----袁再华 张 锋等(17)
5. 机载视轴稳定跟踪伺服系统-----张秉华(24)
6. 离焦模糊图像参数化的热图成像研究-----何志彪 易新建(32)
7. 大动态范围下的热像显示-----雷 春 张保民(35)
8. 对加强军用光电总体技术研究看法-----方敬诚(40)
9. 新型光电跟踪系统的设计与构造-----黄永梅 付承毓等(44)

光电对抗与制导

10. 干扰双色制导的诱饵技术研究-----汪 涛 樊 祥(50)
11. 基于“猫眼”效应的光电敌我识别技术-----邹继伟 吕跃广等(57)
12. 大视场扫描型红外预警相机的探测器-----唐绍凡 刘兆(62)
13. ★防空导弹武器系统光电综合对抗技术研究-----费锦东(68)
14. ★“爱国者”导弹发动机激光破坏的计算分析-----邵元培 计世藩等(74)
15. ★激光对抗技术-----赵勋杰(88)
16. 光电对抗中的激光武器技术-----杨晓段 苏兰尊(91)
17. 中远红外伪装技术的新近展-----王家营 马庆亮等(94)
18. 某型导弹抗干扰性能改进的技术可行性研究-----朱振良(97)
19. 机载光电对抗技术-----李 莹(102)
20. 激光隐身涂料的雷达隐身和红外隐身性能研究-----王自荣 于大斌等(106)
21. 假目标模拟技术和效果分析-----刘益民 王家营(109)
22. 激光告警技术中截获半径分析-----孙建国(112)
23. 双波段红外警戒系统的仿真设计和实现-----李智勇 虎卫东等(121)
24. 光电对抗装备中光电探测/干扰综合系统的基本技术问题-----张孟伟 谢德林(125)
25. 邻域相关处理技术调试方法的研究-----王海先(132)
26. 激光有源干扰技术发展综述-----付 伟(140)
27. 未来光电精确制导技术发展趋势分析-----刘永昌 张 黎(145)
28. ★反坦克炮射导弹的制导技术-----刘敬海 孙志勇等(151)
29. 双色红外玫瑰扫描系统中双色比测量的研究-----皱立建 刘敬海等(155)
30. 玫瑰扫描系统中提取目标方位信息的方法-----邹立建 刘敬海等(161)
31. 自旋导弹控制方法的研究-----黄自强(167)

32. CH红外导引头简介-----李才伦(176)
33. 多采样率信号处理在系统仿真中的应用-----王铁红(186)
34. 光学成像制导仿真系统方案分析-----许士文 范志刚等(189)

图像处理与目标识别

35. ★一种基于多基线的分级匹配方法-----张天序 詹 鹏(193)
36. ★数据挖掘技术在建模、优化、故障诊断中的应用-----杨 杰 黄 欣等(200)
37. 图象分割技术的综合评估-----邓雁萍 狄宇春(206)
38. 一种目标识别新算法的研究与应用-----戴俊钊 于红岗等(211)
39. ★图象生成技术及其在导弹仿真中的应用-----丁明跃 桑梓勤等(215)
40. ★红外热图像时间域新型抑噪技术研究-----柏连发 陈 钱等(223)
41. ★基于边缘约束的红外目标图象松弛分割技术-----桑 农 张天序等(228)
42. 一种非线性带通滤波器在图象预处理中的应用-----钟 胜 桑 农等(234)
43. 一种强噪声环境中的图像边缘提取算法-----殷德奎 雷 春等(238)
44. 红外图象数据库的研建-----刘劲松 闫剑峰等(241)
45. 一种综合利用通用霍夫变换与 Snake 算法对系列图象分割的方案--邓 航 余松煜(245)
46. 一种基于 Kohonen 神经网络的深度图像分割方法-----邹 宁 李 庆等(249)
47. 图象边缘提取中自动门限值获取法-----张小莉 王 敏等(253)
48. 一种基于小波倒谱系数特征的语音命令识别系统-----何 昕 刘重庆等(257)
49. 融合计算机形态学的基于 Hausdorff 度量的图像匹配-----赵立初 施鹏飞(261)
50. 基于曲率的三维规则表面网络数据压缩方法-----侯文军 胡汉平等(264)
51. 一种实用型亚象元定位方法的研究-----冷何英 戴俊钊(269)

红外材料、器件及焦平面阵列

52. ★“风云二号”卫星用水汽热红外双波段探测器-----徐国森 方家熊等(275)
53. 红外焦平面器件非均匀性校正技术研究-----曹治国 魏洛刚等(284)
54. 晶体生长过程中首先凝固点的实验观察-----王 跃 李全保等(288)
55. PtSi 红外焦平面芯片可靠性物理分析-----姜小波 刘 发等(293)
56. ★红外探测器响应非均匀性对系统灵敏度的影响-----王英瑞(298)
57. 红外凝视焦平面非均匀性校正-----蔚 钟(305)
58. 国外多量子阱红外焦平面阵列研制情况-----王子滨 刘鲁勤等(309)
59. 焦平面用碲镉汞薄膜材料质量评价-----吴人齐(315)
60. 基于提高两点温度定标法精度的焦平面非均匀性校准技术研究-----胡晓梅(318)
61. 红外焦平面阵列读出电路的选择要求-----王 巍(323)
62. CCD探测器的饱和及损伤特性研究-----蔡德芳 文建国等(327)
63. 高速 CCD 光电成像传感器的发展及其在常规兵器试验中的应用-----高德平(332)
64. 焦平面型阵列探测器光电参量测试方法及仪器结构研究-----任建伟 杨怀江(340)
65. 一种新型结构的 InSb 线列焦平面探测器-----杜红燕(342)

激光技术及应用

66. ★强激光的传输变换和光束控制研究的进展-----吕百达(345)
67. ★人眼安全 OPO 激光雷达的新进展-----朱大勇(353)
68. 激光雷达测振技术的研究-----蔡喜平 乔立杰等(358)
69. 圆极化微波激励气体激光放电等离子体特征研究-----余学才 刘盛纲等(362)
70. 激光雷达信号大气传输的光束畸变效应研究 激光雷达信号大气传输
效应的研究之二-----强希文 屠琴芬等(369)
71. CW 激光辐照 PV 型 InSb 探测器光电效应的理论研究-----强希文 黄流兴等(374)
72. 利用可调谐外腔半导体激光器实现的波长转换-----叶亚斌 郑小平等(378)
73. ★激光成像技术在巡航导弹中的应用前景分析和对策建议-----陈 刚(384)
74. CO₂ 激光架束制导技术研究-----罗毓昂 陈亦庆等(389)
75. 偏振态匹配对 CO₂ 激光脉冲及脉冲外差信号的影响-----王春晖 赵树民等(399)
76. 光纤陀螺的信号处理方案评述-----戴旭涵 周柯江等(403)
77. ★二极管泵浦固体激光雷达的研究-----乔立杰 蔡喜平等(411)
78. 小波在相干激光雷达信号处理中的应用-----乔立杰 张小富等(416)
79. 1.06 μm 激光雷达目标散射截面的实验研究-----乔立杰 杨 洋等(421)
80. 激光制导及其干扰技术-----方有培(429)
81. 激光-红外复合引信构思-----王建国(437)
82. 10.6 μm 激光对 MgF₂ 光学材料的热力效应-----漆海滨(442)
83. YAG 连续激光对玻璃钢材料的破坏效应研究-----刘淑英(447)
84. 激光辐照度的数值计算与分析-----计世藩(454)
85. 衍射型半导体激光器列阵准直器设计、制作及误差分析研究---周崇喜 杜春雷等(459)
86. 高功率激光偏振合成特性研究-----闫连山 张世文(465)
87. 大功率激光二极管泵浦固体激光器中散热技术的研究-----文建国 蔡德芳等(471)
88. 有源光开关交换矩阵中的 SOA 门性能研究-----胡晓君 刘德明等(476)
89. 大型并列多级液压缸的激光同步控制-----于海军 夏 军(482)
90. 用 CPLD 电路实现激光引信电路系统小型化设计-----王金花 陈斐霞(486)
91. YAG 投影管光谱和色度测试系统-----蒋 泉 李军建等(491)
92. 基于背景分析的蓝绿激光探潜信号检测-----彭复员 周鑫杰等(495)
93. YAG 投影管亮度和寿命的测试-----李军建 成建波等(499)
94. 激光告警可靠性设计-----沈长有 冯晓荣(502)
95. 数字化闭环光纤陀螺仪技术-----梁志军 谷云彪(507)
96. 小功率 CO₂ 激光器获得 TEM₀₀ 模的制作工艺-----王希权(512)
97. 全固态激光雷达的产业化发展-----戴永江 陈相君等(515)

空间技术及光学系统设计

98. 卫星光通信技术发展趋势-----马 晶 谭立英(520)
99. 美国陆地卫星遥感器的发展-----金志煜 彭锦霞(524)
- 100 模糊可靠性理论在航天器舱段设计中的应用-----孟新强(528)
101. 前视红外扫描光学系统的发展及其设计-----孟军和(534)
102. 空间光学遥感器新型分光技术探讨-----高 军(542)
103. 红外空间观测站-----张荣辉(545)
104. 星载超光谱成像技术应用及现状分析-----王丽霞 王 慧等(552)

105. 用于红外激光成像加工的一种波长匹配光路-----侯德胜 冯伯儒等(560)

气动光学系统设计

106. 强迫对流冷却下激光窗口热效应分析-----杜少军 陆启生等(564)
107. 据目标气动加热红外辐射特性选择探测器工作波段-----梅登富(569) :

其 它

108. VXI 总线消息基器件的研制-----王岳环 汪国有等(573)
109. 云纹干涉法测量误差分析-----贾晓东 聂建军(577)
110. 夜视技术在导弹发射车夜间驾驶中的应用-----郭晓松 张向东等(584)
111. 光电复合缆设计初探-----徐继东 朱 清(588)
112. 用于产生场发射器阵列图形的干涉光刻技术-----冯伯儒 张 锦等(593)
113. 光漂白法制备非线性有机聚合物分路波导-----贾振红(597)
114. 一种航天微重力测量系统的可靠性-----程玉峰(600)
115. 红外技术在消防领域中的应用-----赵敏学(606)

文 摘

116. 资源卫星红外多光谱扫描仪现状及发展前景-----王怀义(610)
117. 对超辐射发光二极管组件实际应用的研究-----孙荣凯 吴衍记 彭昱等(610)
118. 采用多功能集成光学器件的全数字闭环光纤陀螺仪-----彭 昱 吴衍记 孙容凯等(611)
119. 光纤编码阵列研究-----杨亚培 刘永智 饶建珍(611)
120. 光电经纬仪误差综合校正技术研究-----杨 虎(612)
121. 战术防空激光武器的需求与发展动态-----计世藩(613)
122. 现代战争中防空导弹武器系统的光电对抗技术-----马毅飞 计世藩(613)
123. 层流流场光学传输效应研究-----李秋颖 费锦东 杨冬玲(613)
124. 利用地面线特征定位的匹配算法的模拟-----董亦兵 金善良(614)
125. 窗口温度对目标探测影响的简化分析-----李培田 刘纯胜(614)
126. 光电技术在钢板表面缺陷检测中的应用-----赵文平(614)
127. 多元长波光导碲镉汞红外探测器组件-----程开芳 杨雄超(614)
128. 50 元 MCT 光导探测器组件与斯特林制冷机配接-----杨雄超 程开芳(615)
129. 利用结构光与单 CCD 相机的三维自动测量系统-----雷玉堂 罗辉 雷琼(615)

第二代红外成像系统

杨应槐

(航天工业总公司 8358 所 天津 300192)

摘要:本文首先描述了第一代和第二代红外成像系统的概念。然后,讨论了第二代红外成像系统优点和应用模式,最后强调指出,当前应加快发展第二代红外成像系统及相应的技术以提高红外系统技术水平。

关键词: 焦平面阵列探测器 第二代红外成像系统 凝视红外成像系统 过扫描

The second generation IR imaging system

(Jin-Hang Institute of Technical physics)

Yang ying huai

Abstract:The paper first describes the concepts of the first and the second generation IR imaging system (IRIS). Then, it is discussed of the advantages and operation mode of the second generation IR imaging system. Finally, it is pointed out that we should at full speed develop IRIS and the corresponding technologies to improve the performance of IRIS.

Keywords: Focal plane detector array; Second generation IR imaging system; Staring IR imaging system ; Overscan

1. 背 景

目前,我国红外成像技术有了较大进展,主要表现在以下几个方面:一是红外探测器取得令人瞩目的成绩,继光导 180 元线列探测器研制成功之后,配有闭环斯特林制冷的光导 160 元线列探测器研制出样品。这标志着我国多元红外探测器即将进入工程应用。光伏型 4N 阵列探测器已进入重点技术攻关项目,可望在 2000 年左右达到实用化程度;大规模凝视焦平面阵列探测器已列入专项技术研究,组织各相关专业进行技术攻关,据悉在读出电路方面率先取得成功。这一切表明,国内红外探测器面对落后,大有奋起直追之势。

二是各种类型的红外成像系统以开始在多种武器上得到应用。如舰载和机载火控系统,舰载搜索跟踪系统,机载导航和瞄准,导弹的精确制导等。虽然应用是多方面的,但就红外成像系统本身而言,接收目标辐射能量的器件都是采用光导型多元线列探测器,其扫描方式为并扫描居多。近期国外将光伏型 4×288 红外探测器推向我国市场,这给我国红外成像系统更新换代提供了条件。而国内第一代红外成像系统在各种装备上的应用为自身升级换代奠定了技术基础,由此看来,我国的第二代红外成像系统面世已不是十分遥远的事了。

2. 第二代红外成像系统

第二代红外成像系统和第一代红外成像系统的主要区别是使用红外探测器上的不同：可以这样说，采用分立的光导探测器的红外成像系统就为第一代红外成像系统（简称Ⅰ代）；而采用在焦平面上带有读出电路的光伏型探测器的红外成像系统成为第二代红外成像系统（简称Ⅱ代）。当使用的焦平面上带读出电路探测器规模大到足以覆盖应用所要求的视场，无需采用扫描机构时，即为凝视红外成像系统，前者称为扫描焦平面成像系统，后者称为凝视焦平面成像系统，两者统称为焦平面成像系统。

3. Ⅱ代与Ⅰ代红外成像系统性能的比较

从理论分析和应用实践证明，与Ⅰ代相比，Ⅱ代具有以下优点这里仅以Ⅱ代初级阶段的扫描焦平面红外成像系统为例进行比较。

3. 1 高性能

Ⅱ代性能高于Ⅰ代主要有以下几个方面：

a. 光伏型比光导型探测器性能高 $\sqrt{2}$ 倍

尽管光伏型和光导型探测器同为光子探测器，但由于作用机理不同相同探测器元数，两者都达到背景限性能时，光伏型探测器不存在再复合噪声，因而其性能比光导型探测器高 $\sqrt{2}$ 倍。

b. 使用的探测器元数多

光伏型探测器，在光子作用下形成内电场，不用加偏流，这样，这种类型探测器所需制冷功率就很小，因而光伏型探测器具有制作大规模阵列探测器的内在潜力。以目前在用的 4×288 元为例，比 120 元（或 180 元）多 6.4 倍，这就意味性能高 $\sqrt{6.4} = 2.5$ 倍。考虑到光伏型探测器比光导型探测器响应光谱范围窄，其结果相同温度下系统接受的辐射能量相应地减小，详见以下计算：

$$W_{pc}(300k) = \int_{7.7}^{11.5} W(300)d\lambda = 1.0661 \times 10^{-2} (w/cm^2)$$

式中 $W_{pc}(300k)$ 和 $W_{pv}(300k)$ 分别为光导型和光伏型两种类型对 300k, z 在其响应光谱范围

$$W_{pv}(300k) = \int_{7.7}^{10.5} W(300)d\lambda = 0.7657 \times 10^{-2} (w/cm^2)$$

内可接收的能量密度。

$W_{pc}/W_{pv} = 1.39$ ，这个比值与 $\sqrt{2}$ 相接近，言下之意光伏型具有 1.39 倍优势正好抵偿了其响应光谱窄的缺陷，于是光伏型 4×288 探测器与光导型 180 元线列探测器相比，理论极限水平可使系统性能提高约 2.5 倍。

3. 2 成像质量的改善

Ⅱ代红外成像系统得到改善的原因是：

a. 直流耦合的工作方式

使用光伏型探测器，由于不用施加工作电压，无需采用隔直电容器，这样，探测器与前置放大器之间为直流耦合，它避免了交流耦合的种种弊端，成像质量得到改善。

b. 串并扫描的探测器结构形式

从图·1 所示的 4×288 探测器结构形式不难看出, 该结构形式以两列交错并排为主, 每一元又串出三个探测元, 前者使其填充系数为 1, 后者使 4 个探测元相加, 既消除盲元, 有改善探测器的均匀性, 进而提高探测器的成像质量。

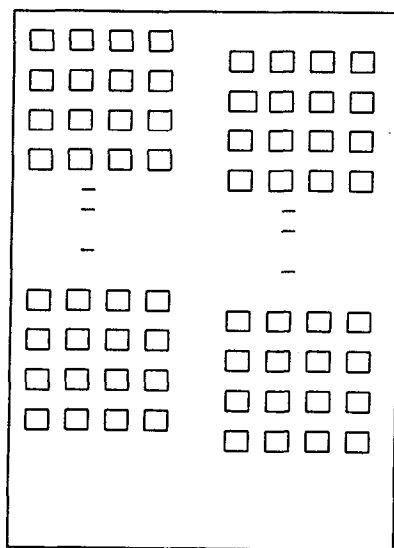


图 1 4×288 探测器结构

3. 3 减小了红外成像器的体积

使用 PC-MCT 线列探测器必须配置相应于探测器元数相同的前置放大器和主放大器, 与以上情况相比, 其空间尺寸, 保守估计可减小四分之一, 也就是说, 4N 阵列探测器更适合于空间尺寸要求苛刻的各种导弹上的红外成像器的应用。

3. 4 降低了成本

红外探测器在成本中占有较大的比重, 所以探测器成本降低了, 成像器成本方能降下来。从目前国际市场购买一个 PC-MCT120 元工程应用的探测器, 价格为 6.5 万美元, 而买一个 PV-MCT 4×288 元阵列探测器单价约为 5 万美元。光导型探测器再考虑到与其配用的前置放大器、主放大器高速多路开关的费用, 约为探测器费用的三分之一, 这样综合考虑, 相当光伏型探测器单元成本为 1000 美元。而光伏型探测器单个探测元成本约为 5 美元。而当前 PV-MCT 128×128 元凝视阵列探测器其单元价格约 3 美元左右, 再顾及扫描机构的省略而使其费用减小得因素, 基本上实现了人们所期望的单元 1 个美元的水平了。

4. 应用特点

4. 1 并扫描体制的延续

使用 4×288 阵列探测器的红外成像系统, 原则上可沿用 I 代的并联扫描机构来扩大视场的覆盖范围。从表面上来看, 只是两种不同类型探测器的替换; 实质上, 从红外成像技术发展观点, 启用 4×288 阵列探测器之时, 便是 II 代红外成像系统面市之日。它即基于成熟的 I 代扫描成像技术, 又初步涉及凝视成像方式。主要表现在探测器信号读出方式。很明显, 这是

从扫描成像过渡到凝视成像一种较好的形式，使焦平面探测器元数规模大到可满足应用所要求的视场覆盖，无需扫描机构，水到渠成，凝视成像系统也就实现了。

4. 2 工作模式

比较当今在用的多元红外成像系统，我们便注意到这样的事实，即红外成像系统实际使用的有效通光孔径小于这个工作波段对应的衍射限孔径，两者之间的关系为：

$$D_{\min} = kD_a$$

$$D_a = \frac{2.44\lambda}{\alpha_0}$$

式中

D_a —衍射限通光孔径；

α_0 —瞬时视场；

λ —响应光谱范围内的平均波长；

k —孔径常数。

由于采用以上工作模式，必然造成接收能量的损失，为了表征这种情况下能量损失程度，引入一个能量利用率，并由下式表示：

$$\eta_p = 1 - J_0^2\left(k \frac{D_{\min}}{D_a}\right) - J_1^2\left(k \frac{D_{\min}}{D_a}\right)$$

当 $D_{\min} = D_a$ 时， $\eta_p = 0.84$ ，可见 $D_{\min} > D_a$ 时， η_p 值便会小于 0.84。两者差别越大， η_p 值就越小，当然，它也有一定限度， k 即取值为 1-1.5。这个通光孔径减小引起接收能量的损失，以增加探测器元数和高性能来补偿，其直接获益是实现轻小化、高分辨率、高性能的红外成像系统。

4. 3 隔行扫描

图 1 所示的 4×288 阵列探测器，从应用效果可以等效于图 2 所示的结构形式：



图 2 4×288 阵列探测器等效结构

从图 2 可以看出，这种结构形式在俯仰方向上的覆盖，从形式上看是无漏扫的，因为两排奇、偶交错，就这个意义上说无需隔行扫描。但是为了提高系统的空间分辨率，有必要采取隔行扫描 (overscan)。

同是隔行扫描，在第一代红外成像系统中是用于弥补探测器自身缺陷以实现完全覆

盖所要求的视场；而在第二代红外成像系统应用隔行扫描是为实现过扫描（overscan）以提高系统的空间分辨率。为了便于说明这个问题，将图 2 等效于图 3。1, 2...128 表示第一场，而 1', 2'...128' 表示第二场，这样两场合为一帧，288 元相当于 $2 \times 288 = 576$ 条扫描线效果。

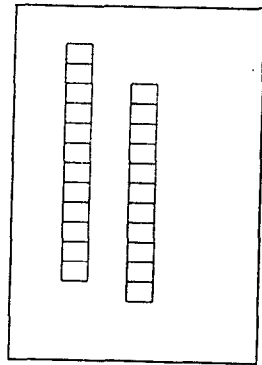


图 3 4×288 阵列探测器等效结构

5 面临的抉择

综观世界各国红外成像技术的发展过程，我们便可清楚看出，各国都是依据本国的特点走自己的路，最大限度地展示自己的优势，大约花了近 20 年的时间走完第一代红外成像系统的历程。而他们又几乎在同一个时期步入第二代红外成像系统的历程。开发第二代红外成像系统已成为现实。第三代红外成像系统概念正在酝酿之中。据权威人士预测，约在 2040 年左右第三代红外成像系统将在美国面世。

回顾我国红外成像技术发展所走过的路，最大的遗憾是没有形成自己的特色，以至于出现第一代红外成像系统还未立足，又受到第二代红外成像系统应用要求的冲击，针对我国目前红外技术发展的现状，面临发展的第一代和第二代红外成像系统的抉择，我个人认为，无论从红外技术的发展，还是从系统应用的角度考虑，都应该集中攻克 4N 阵列探测器，优先发展第二代红外成像系统。因为现阶段，第一代红外成像系统，严格地说，达到工程应用的程度还有一定的差距，与其兵分两路，还不如集中兵力，重点发展第二代红外成像系统及其相应的技术，对凝视红外成像系统是个促进，又能在较短的时间内给各种装备提供高性能的第二代红外成像系统，使我国的红外成像技术越上一个新台阶。

分布孔径红外系统的研究现状及其展望

范晋祥

中国航空工业总公司第六〇七研究所 无锡 214063

[摘要] 分布孔径红外系统(DAIRS)代表着军用被动电光系统设计的新方向,它采用多个基于大面阵红外焦平面阵列的大视场红外传感器实现全方位、全空间敏感,并由单一的中央信息处理机对各个单独的传感器所获取的数据进行处理,以实现与战斗机平台任务相关的导弹逼近、告警、红外搜索与跟踪,地面海面目标成像跟踪、夜视夜航及态势告警等多种功能。DAIRS 的独特之处是它是由信息处理机而不是探测器驱动的系统,系统性能、功能的提高主要依赖于高速大容量信息处理机及各种功能算法,这标志着军用被动电光系统设计思想的根本变革。本文介绍了 DAIRS 的基本概念与研制现状,讨论了 DAIRS 在先进战斗机及其它作战平台上的应用,并简略介绍了其中涉及的关键技术。本文还对 DAIRS 系统将来可能的发展趋势作了预测。

关键词: 红外系统 红外焦平面阵列 信息处理 红外搜索与跟踪 导弹逼近告警

1 引言

分布孔径红外系统(Distributited Aperture Infrared System-DAIRS)是军用被动电光系统研究领域的一个新概念,是目前乃至 21 世纪初军用被动光电系统发展的新方向。DAIRS 采用一组精心地布置在飞机(或其它军用平台)上的传感器阵列实现全方位、全空间敏感,并采用各种信号处理算法实现空中目标远距离搜索跟踪、导弹威胁逼近告警、态势告警、地面海面目标探测、跟踪、瞄准、战场杀场效果评定、武器投放支持及夜间与恶劣气候条件下的辅助导航、着陆等多种功能能力,从而能够用一个单一的系统完成以前要用多个单独的专用红外传感器系统(如红外搜索跟踪系统、导弹逼近告警系统、前视红外成像跟踪系统、前视红外夜间导航系统)完成的功能。DAIRS 所采用的红外传感器使用了二维大面阵红外焦平面阵列,这些传感器是固定在飞机上的,这就消除了红外搜索跟踪系统、前视红外成像跟踪系统等所采用的高成本的瞄准与稳定机构,这样一个典型的红外传感器设计的重量、体积与功耗将低于现有的机载红外传感器系统的 5%。因此,DAIRS 不仅是一个高性能的多功能一体化综合传感器系统,而且是一个高性能/价格比、高可靠性、高可支持性、可生存性的系统,其重量、体积、功耗也比现有的机载红外传感器系统低得多,这正是新一代军用航空电子综合系统所期望的特征,因而近年来美国 Northrop Grumman 公司等公司开始全力发展这种采用全新的处理机驱动设计理念的 DAIRS,并且取得了一定的进展。

本文首先简略地介绍了 DAIRS 的基本概念与研究现状,然后概述了 DAIRS 在先进战斗机中的应用,并简要介绍了 DAIRS 在其它军用平台中的应用,并根据美国的 DAIRS 研究情况,阐述了 DAIRS 的关键技术。最后对军用机载被动电光系统的未来趋势进行了展望。

2 DAIRS 的基本概念与研究现状

过去 30 年来, 军用被动红外系统已经取得了巨大的进步, 基于第一代通用组件长波红外探测器阵列的第一代前视红外成像系统已广泛地装备了多种军用平台, 基于第二代红外焦平面阵列的第二代前视红外成像系统、红外成像导引头、机载及舰载红外搜索与跟踪系统以及导弹道逼近告警系统也已成为现实。随着红外焦平面阵列探测器技术的发展, 第三代军用红外传感器正在成为现实, 这种传感器采用了多达一百万(1000×1000)个探测器单元的二维大面阵焦平面阵列, 这样, 一个基本的红外传感器系统现在可以只包括光学、探测器阵列及某些简单的电路, 而无需高成本的、复杂的瞄准与稳定机构与光机扫描机构, 这种新传感器为重新思考电光系统的设计思想创造了条件。为此, 美国 Northrop Grumman 公司在研究第一代凝视式红外传感器概念起就开始探求发展新的系统概念, DAIRS 就是由 Northrop Grumman 公司提出的一种全新的处理机驱动的设计概念。

如图 1 所示, DAIRS 采用一组精心地布置在军用飞机上的传感器阵列实现全方位、全空间(4π 立体角)覆盖, 并利用一个单独的中央处理系统采用各种信号处理算法实现多种功能能力。一组 6 个传感器是完成全方位、全空间覆盖的最低要求, 这是因为由于光学设计的限制, 每个传感器的视场只能略大于 $90^\circ \times 90^\circ$ 。

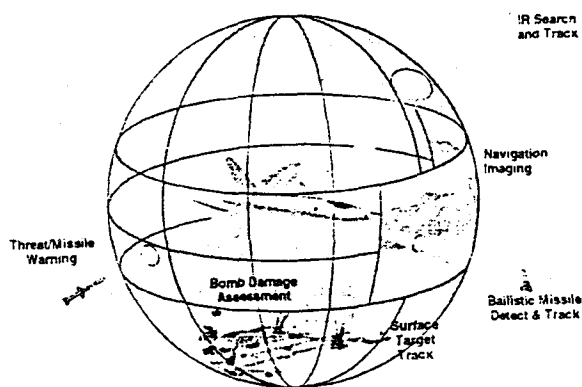


图 1 DAIRS 提供了 4π 立体角传感器覆盖和多种功能能力

DAIRS 是一个处理量巨大的系统, 可以把它看作一个产生单一的高数据率数据库的传感器阵列, 由一个中央处理机从数据库中抽取相关的数据以得到 DAIRS 要求解的多个功能解(见图 2)

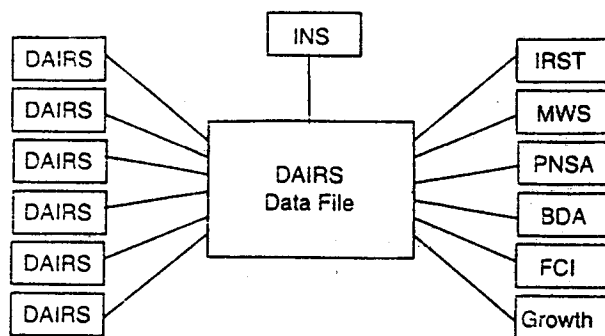


图 2 DAIRS 为多功能处理提供数据库

传感器处理集中在功能处理中以确保由功能需求驱动传感器设计, 各个功能算法分别完成红外搜索跟踪、导弹逼近告警, 图像识别与跟踪等各种功能, 但有些处理(如运动补偿、标准栅格变换等)是由各个功能算法共享的。

DAIRS 的技术基础是大面阵红外焦平面阵列技术与高速大容量信息处理技术。由于 DAIRS 同时集成了与战斗机平台任务相关的远距离空中目标搜索与跟踪、地面海面目标探测、识别、跟踪, 导弹逼近告警、攻击效果评定, 夜间辅助导航着陆等多种功能, 不仅要求其红外传感器能实现全方位、全空间覆盖, 同时还要求其红外传感器有足够高的空间分辨率以实现对各种目标的准确的跟踪、定位, 而且要有足够高的数据采样率以保证跟踪高速飞行的飞机、弹道导弹和巡航导弹和必需的目标航迹测量、估计精度, 因此必须采用大面阵的红外焦平面阵列, 而且由于光学系统设计的限制, 每个传感器的最大视场均为 $90^\circ \times 90^\circ$, 至少需要采用 6 个传感器构成一个传感器阵列。

DAIRS 要采用一个中央处理机对 6 个以上的红外传感器(采用超过 1000×1000 个探测器单元的二维红外焦下面阵列)所获取的大量的数据进行处理, 从中抽取有用的信息并实现各种功能, 因此其信息处理与存储要求很高, 因此必须采用高速大容量的信息处理机。

DAIRS 的研制工作始于 90 年代初期, 当时 Northrop Grumman 公司电子传感器系统部研制了一种分布孔径红外焦平面阵列以实现连续的高分辨率全空间覆盖, 其多种功能包括导弹逼近告警、红外搜索与跟踪、前视红外型目标瞄准指示、杀伤效果评定及导航, 系统可与头盔瞄准系统耦合以使飞行员能下视、侧视或后视。Northrop Grumman 公司还采用 512×512 焦平面阵列研制了一个实验性传感器并采用微扫描技术使其分辨率提高了一倍(达到 1024×1024 元阵列的分辨率)。

在 DAIRS 的基础上, Northrop Grumman 公司目前正在开发多功能红外分布孔径系统(MIDAS), MIDAS 将采用 6 个小的拱形红外传感器, 每个覆盖 $90^\circ \times 90^\circ$ 的视场, 探测器阵列至少为 1000×1000 元以便采用单视场光学系统实现高分辨率, 可能还将包括一个高性能目标瞄准传感器。目前美国已研制出了 1024×1024 元的中波 HgCdTe 焦平面阵列。Northrop Grumman 希望在 1999 年下半年在其 BAC 飞行试验台上进行相关技术的初步飞行验证, 以验证其概念与初步设计, 然后于 2001 财年下半年在 TAV-8B 上对最终设计的系统进行飞行试验。一个完整的系统要耗费 50 万美元, 而采用多个传感器分别完成不同的功能, 则要耗费 500 万美元或更多。

如果分辨率达到光学系统所能允许的极限, DAIRS 所能提供的功能还可进一步提高, 现有的宽视场光学设计可以支持高达 4000×4000 阵元的探测器阵列, 但这远远超出了近期内探测器阵列的最高水平。而对于 DAIRS 可能应用的战斗机平台——JSF, 采用 1000×1000 阵元的探测器阵列是一个现实的选择: 虽然采用这样规模的探测器阵列不能得到实现 JSF 性能目标所需的分辨率, 但 Northrop Grumman 公司已经发展了一种称之为微扫描技术的信号处理算法, 采用微扫描技术可以使传感器的有效分辨率至少提高 2 倍, 如果可以得到更高的处理能力, 采用现有的光学系统与探测器, 其分辨率可提高 4 倍。

除了实现超分辨率的微扫描技术外, Northrop Grumman 公司还在研究 DAIRS 的过程中解决了大面阵焦平面阵列输出的非均匀性校正(NUC)问题及时间帧积累问题, 非均匀性校正与时间帧积累相结合可使灵敏度提高 12 倍, 这是实现导弹逼近告警及IRST的最大距离性能的关键。

3 DAIRS 在先进战斗机及其它作战平台中的应用

3.1 DAIRS 在先进战斗机中的应用

DAIRS 应用可大致计划分为成像应用与未分辨目标(如远距离导弹或飞机)探测两大类, 前者的目的是使景物(目标)的细节最清晰, 而后者主要目的是提高灵敏度且抑制干扰, 使探测距离更远, 虚警率更低。成像应用包括夜视/夜航、导航、态势告警、地面海面目标瞄准及攻击效果评定的信息支持, 未分辨目标探测应用包括导弹逼近告警与IRST。

3.1.1 成像应用

对夜视/夜航应用而言, DAIRS 与显示系统及飞行员的人机交互关系决定了对 DAIRS 的要求。此时要求放大率为 1, 以便为飞行员提供与白天所看到的真实外景类似的环境图像。根据对现有的夜间导航前视红外的使用经验, $0.5 \sim 1.0\text{mrad}$ 的分辨率似乎是可以接受的最低分辨率, 由于飞机振动对飞行员视沉的影响会造成视觉分辨力下降, 实现人眼的分辨极限(0.15mrad)是不必要的。为了克服座舱显示系统(平显)的视界限制, 最好采用头盔显示(HMD)。但为了避免使用 HMD 时出现的假象, 必须有一个无失真的无间隙图像, DAIRS 的全方位、全空间覆盖能力就可以实现这一目标。采用 DAIRS 与 HMD 还能在 JSF 在 VSTOL 模式下降时具有看到甲板的能力。此外, 飞行员还能看到邻近的飞机使用电子可操纵后视镜提高态势告警能力。

如果 HMD 是透明型的, 就可以看到与所敏感的场景迭加在一起的真实场景, 为此必须进行精确的配准。为此必须在 DAIRS 中引入分辨率为输出采样分辨率的几分之一标准栅格, (用飞机的 IMU 校正到这一程度), 并将像素投影到标准栅格上以消除所有的失真, 这就要求实时完成图像变形算法运算。

标准栅格也能用于 DAIRS 图像与高性能瞄准传感器的放大图像之间的配准。将放大图像的一部分插入到 1 倍率的图像中就可以为帮助飞行员捕获与识别目标的放大图像提供关联信息。

战场攻击效果评定(BDA)最好采用超高分辨率传感器完成, 然而 DAIRS 可以通过提供连续的全方位全空间的覆盖提供有用的数据, 并补偿其有限的分辨率, 因为时间历史事件是重要的线索(时间历史事件包括冲击爆炸、延迟爆炸或武器所产生的热气体喷出的尾焰或碎片以及武器命中目标的燃烧)。对于这些情形, DAIRS 是一个可以替代高分辨率传感器的

功能 BDA 传感器。关键要求是要有足够高的动态范围以敏感到这些高强度的但非常短暂的事件,而不会出现现有的系统所出现的过载或长恢复时间问题。可以采用新颖的控制策略以优化 DAIRS 的 BDA 应用。使动态范围提高到 $60 \sim 70\text{dB}$ (在外景物基础上),从而实现超过 90dB 的内景物动态范围。

3.1.2 未分辨目标探测应用

远距离空中目标红外搜索与跟踪(IRST)与导弹逼近告警属于对未分辨目标的探测问题,是 DAIRS 的两个功能子集。机载 IRST 的主要功能是在与机载武器系统及机载雷达相适配的远距离处,在存在杂波背景辐射及其它干扰的战场环境中准确、可靠地自动搜索、探测、定位并连续跟踪所搜索的大范围空域中的多个机动空中目标,机载导弹逼近告警系统(MAWS)的主要功用是采用几个(4 个到 6 个)基于凝视式红外焦平面阵列的大视场红外传感器,对载机进行全方位覆盖,从而从尽可能远的距离上探测并定位来袭地空、空空导弹,并将导弹到达方向(AOA)信息反馈给红外干扰系统以便实施更有效的干扰。显而易见,对目标/威胁的最大探测距离与杂波、干扰抵制是 IRST 与 MAWS 的最关键的问题。因此 DAIRS 能否有效地实现这两个功能子集,主要取决于 DAIRS 能否达到专用的 IRST 与 MAWS 系统的最大探测距离与杂波抑制水平。

对目标/威胁的最大探测距离是由灵敏度决定的,这就是“晴空距离”,它与瞬时视场(IFOV)成反比,但通过时间积累可以进一步提高探测距离,当然由于目标尚未探测到,而且还会相对于惯性背景运动,因此通过直接目标配准实现时间积累是不现实的。因而在 DAIRS 中采用了阵列速率滤波器对在一定的视线角速率范围的目标进行积累。由于采用了时间帧积累,再加上对焦平面阵列的非均匀性校正,可使灵敏度提高 12 倍。

晴空距离通常是学术界感兴趣的,因为实际的探测距离要受杂波造成的虚警限制。对晴空背景,目标 SNR 为 $3 \sim 5$ 就可得到可接受的虚警,而要从城市杂波等地杂波环境中探测出典型的飞机,则可能要使检测门限提高到 $50 \sim 100$ 倍 SNR,以实现可接受的虚警率,这样就使探测距离减少了 $3 \sim 6$ 倍,对 MAWS 而言,由于云及地面杂波的影响,也会使实际的探测距离大打折扣。因此杂波抑制是未分辨目标检测的最关键的问题。目前美国 Lockheed Martin 电子与导弹公司、Northrop Gramman 公司、Hughes 飞机公司等公司已针对 IRST 与 MAWS 开发了多种行之有效的杂波抑制技术,如自适应 CFAR 门限检测、空间滤波、空时自适应滤波三维辨别处理,目标航迹关联滤波、速度滤波与多光谱滤波。由于这些技术已成功地应用到了机载 IRST 与 MAWS 系统中,无疑也可通过进一步的改进移植到 DAIRS 的相应的功能算法中,而由于 DAIRS 采用了高帧频凝视式焦平面阵列,可以显著地提高速度滤波这种杂波抑制技术的有效性。

3.2 DAIRS 在其它作战平台中的应用

DAIRS 除了可能用于 JSF 等先进战斗机外,还可用于其它军用作战平台,如旋翼飞机、舰船及坦克。

旋翼飞机可以从 DAIRS 的高帧频中获得收益,因为贴地飞行时场景的相对运动速度很快。对装甲战车,为了对付自上而下的攻击需要在现有的战车上增加早期告警能力,这样通过将 DAIRS 与干扰结合使用就可以避免攻击武器到达薄弱的顶装甲。此外 DAIRS 所能提供的功能能力等价于现有的指挥长观察仪、瞄准具与驾驶员观察仪而减少了坦克特征,且无需陀螺稳定瞄准机构。舰载防御系统(用于对反舰导弹与威胁飞机进行防御)对被动电光系统有非常强烈的渴求,为此国外几大军事强国均研制了多种舰载红外搜索与跟踪系统,

舰载光电火控系统,因为它们比射频、微波雷达的空间分辨率高得多。但以前用于舰载防御的光机扫描型红外搜索跟踪系统非常沉重、昂贵,而且对安装空间有很多要求,以致于不能更有效地用于其它功能,而 DAIRS 则由于其体积小,且无需陀螺机构,可以比扫描系统节省 60%~70% 的重量与成本,而且可以与其它枪杆安装系统共存。

4 军用被动电光系统设计的未来趋势

在可见的将来,军用被动电光系统将继续沿着多功能一体化和信息处理驱动的方向发展,DAIRS 概念的提出无疑将有力地促进军用被动电光系统的多功能一体化,并由探测器驱动转向信息处理驱动。关于前一点我们在前文中已有阐述,这里主要对第二点进行阐述。

军用被动电光系统的发展由探测器驱动转向信息处理驱动是一个重大的突破,因为同基于 HgCdTe 材料的大面阵红外焦平面阵列的发展相比,基于硅材料的信息处理机的发展速度要快得多,后者基本上遵循摩尔定律,每隔三年集成度增加 4 倍,特征尺寸缩小 $\sqrt{2}$ 倍。这样我们就可以不断采用最先进的信息处理机来实现以往必须采用更大规模的探测器阵列或更加复杂的多视场光学系统才能实现的多种功能能力。信息处理速度与容量的迅速的提高将促进 DAIRS 向着超分辨率、高帧频、多光谱的方向发展。

采用针对 DAIRS 发展的超分辨率技术(微扫描技术),将允许采用简化的单一大视场光学设计实现以往必须采用复杂的多视场光学系统才能实现的最佳的搜索、探测、识别与武器引导、投放功能,某些功能所需要的高分辨率可以通过微扫描技术实现。采用大视场 DAIRS 设计可以消除复杂、笨重的陀螺稳定、瞄准机构,这对机载平台将会带来很大的益处。

虽然 DAIRS 传感器的能力仍然受到大面阵焦平面阵列的规模的限制,因为要同时实现大视场,高分辨率必须采用高达 4090×4090 元的大面阵红外焦平面阵列。但通过采用高速大容量信息处理,采用超分辨率技术也可以实现更高的分辨率,为此需要采用更先进的处理方法(如神经网络)与大容量数据库,神经网络超分辨率处理技术可以使光学分辨率比由衍射效应限制的物理极限提高两倍以上。

灵敏度也受探测器物理效应及物理规模的限制。光伏探测器的动态范围受电荷存储容量的限制,红外景物对动态范围的要求由景物等效温度幅度与传感器的噪声等效温差(NETD)决定。环境温度通常有高达 $80-100^\circ\text{K}$ 的景物内动态范围,这会导致非攻击条件下的短暂饱和,而且战场条件下会经常饱和。现有的传感器已经实现了近 0.010°K 的 NETD 正向实现 0.001°K 的 NETD 的方向努力。所要求的动态范围为 10^4 (14bit/温和环境)到 10^6 (20bits/战场环境)范围内,现有的阵列多个探测器可存储 10^7 电子,少于 12bits 动态范围(对高背景 IR 传感器,动态范围受电子存储容量的平方根的限制),现在已经制成了每个探测器存储 2.5×10^7 个电子的实验阵列),实现 20bits 的动态范围要求将电子存储能力提高 10^5 倍,这是很困难的。

而提高帧频并采用后读出积累则是可行的选择,其结果是对有百万个探测器的阵列以每秒几百帧的帧频进行采样。增加帧频是令人感兴趣的,因为它允许对平台与景物运动有更加动态的环境的更大的带宽,而在像素级对景物特征提供自适应响应,传感器灵敏度的响应速度变成了一个软件功能,这就拓宽了今天不能预见的未来的设计折衷空间。现在已经制出了工作于 480Hz 的 512×512 阵列,根据目前的发展,可望得到每秒 10^9 采样数据