

微光遥感成像技术研发动态评述

向世明¹, 樊学武², 何娜¹, 白喆²

¹西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;

²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 微光遥感成像技术是用微光像增强 CCD(ICCD)弥补现有 CCD 成像器件不足的遥感成像技术,其主要特点是宽光谱响应、低噪声、高灵敏度、大动态范围和智能电子控制。该技术的应用将大大拓展各类航天器的有效工作照度条件和时段范围,从白昼 $10^5 \sim 10^2$ lx(10:00—16:00, 6 h 有效遥感),扩展为白昼/晨曦/黄昏/月光条件下的 $10^5 \sim 10^{-1}$ lx(06:00—18:00, 12 h 有效遥感),使遥感器材能在更宽的时段内从事观察、报告、预警地面的突发事件,如自然灾害、恐怖活动,并为满足必要的地理、地质和测绘等需求提供实时信息。简要评述微光遥感成像技术的基本原理、系统组成、关键技术、性能测试、总体评价及推广应用等方面的最新研发动态和成果。

关键词 遥感; 电荷耦合器件; 像增强器; 像增强电荷耦合器件

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020009

Review on Low Light Level Remote Sensing Imaging Technology

Xiang Shiming¹, Fan Xuewu², He Na¹, Bai Zhe²

¹*Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China;*

²*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

Abstract The low light level remote sensing imaging technology uses image intensified CCD (ICCD), to make up of the existing CCD remote sensing camera. The technology features are wide spectral response, low noise, high sensitivity, large dynamic range, and intelligent electronic control. The ICCD as well as its applications, will significantly expand the applicable luminance conditions and work time of various spacecraft, from 10^5 - 10^2 lx in the daytime (10:00—16:00 for 6 h effective remote sensing time) to 10^5 - 10^{-1} lx under daylight/dawn/dusk/moonlight conditions (06:00—18:00 for 12 h effective remote sensing time). The remote sensing equipment can provide real-time information in a wider period through its observing, reporting, and early warning ground emergencies, such as natural disasters, terrorist activities, as well as some necessary demands in geography, geology and mapping fields. In the paper, we have reviewed the basic principle, system composition, key technique, performance test, overall evaluation and the latest research progress and achievement in application of the low light level remote sensing imaging technology.

Key words remote sensing; charge coupled devices; image intensifiers; image intensified charge coupled devices

OCIS codes 140.1035; 350.3950

1 引言

CCD 是一类新型的固体阵列扫描式光敏成像器件,例如作为手机成像器件被广泛使用。若在 CCD 前端耦合一级微光管或微光像增强器,即可构成所谓像增强 CCD(ICCD)。微光管前端的光阴极比普通 CCD 或人眼视网膜的等效读出噪声低 6~8 个数量级,因此 ICCD 相机比“猫眼”更敏感,能在漆

黑的夜间环境下正常工作。若将 ICCD 用作遥感相机中的探测器,则可大大拓宽遥感器的有效工作时间(从 10:00—16:00 拓宽至 06:00—20:00,甚至更宽),使其能在更宽的时段内观察、报告、预警地面的突发事件,如自然灾害、恐怖活动,并能为满足必要的地理、地质和测绘等应用需求,提供实时信息。

通常,根据具体遥感任务的需要,可以在卫星、飞机或飞船遥感平台上,配置摄影型遥感仪、红外遥

收稿日期: 2017-06-02; 收到修改稿日期: 2017-07-27

作者简介: 向世明(1936—),男,本科,研究员,博士生导师,主要从事微光夜视技术方面的研究。

E-mail: xshiming2003@aliyun.com

感及成像光谱仪、微波遥感仪、太赫兹遥感仪以及可在日间摄取地面高清晰度黑白/彩色图像的 CCD 遥感仪等宽(多)光谱遥感探测成像系统。遥感的对象是地面或外层空间景物的空间位置、形貌或物化特征的时空强度分布。为了拓宽遥感相机的有效工作时间,ICCD 微光遥感相机通常由大口径长焦距物镜、高灵敏度微光 ICCD 探测器组件、智能化电子学控制电路和精密光学机械结构等子系统组成。遥感相机以推扫方式工作,其基本工作原理为:在其平台上沿既定轨道向前飞行的同时,利用光学系统将地面景物的二维灰度分布及颜色分布的辐射亮度,传递至与飞行方向垂直的线阵探测器组件光敏面上,经由光电转换、电荷输运、放大、模/数(A/D)转换等一系列电子学处理,将辐射亮度变为成比例的电压或电流数字信号,并在智能化电子学器件及计算机的控制下,获得早晨到黄昏等低照度下的微光遥感图像信息,并发送给地面接收站,供用户评估和应用。

本文将从 ICCD 微光遥感的理论研究、测试分

析及器件当前水平、与光谱遥感的兼容性、相机定标反演和其他应用成果等方面,分别给予综述性评述。

2 微光遥感成像技术研究动态

2.1 ICCD 微光遥感相机视觉探测方程理论研究

2.1.1 微光管的微光夜视能力

为什么猫能在漆黑的夜晚捕捉老鼠?为什么海龟等动物能在照度为 10^{-8} lx 量级漆黑的深海中自由游弋和生活?为什么人类在夜间行走必须有照明设施?为什么普通数码相机在低照度下拍照时要开闪光灯?究其根本原因,是景物的形貌都是由景物自身的时空亮度对比度分布构成的,即由其具体相邻细节的光子数之差所决定;景物能否被识别和看清,取决于人类或其他动物眼睛自身的热噪声水平、灵敏度和视网膜分辨能力。简而言之,这是由探测成像器件的信噪比所决定的。图 1 为数码相机和红外热像仪拍摄的人手及壁虎的图像,可见壁虎的体温比人手的温度低得多^[1-2]。表 1 列举了 Si-CCD 数码相机和微光管 ICCD 光阴极的热噪声水平数据^[3-4]。

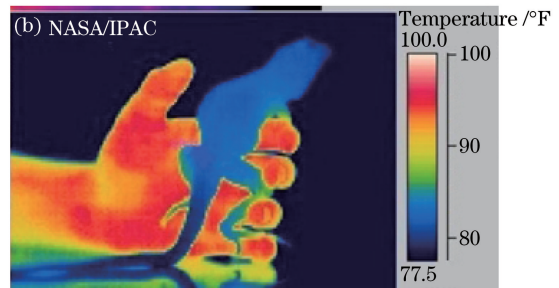


图 1 人手与壁虎的(a)可见光与(b)红外图像比较

Fig. 1 (a) Visible and (b) infrared images of human hand and house lizard

表 1 CCD 与 ICCD 室温下噪声水平的比较

Table 1 Noise level comparison between CCD and ICCD at room temperature

Device	Substrate material	Dark current / ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Number of noise electrons in a pixel of $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$
CCD camera	Si	10^{-7} - 10^{-8}	6.3×10^3 - 6.3×10^2
ICCD photocathode	Sb-K-Na-Cs, GaAs	10^{-15} - 10^{-13}	6.3×10^{-3} - 6.3×10^{-1}

2.1.2 人眼视觉探测方程实验依据

图 2 是典型人眼视觉特性曲线^[2]。所有遥感器都以人眼提供可分辨的地面图像为最终目的,因此有必要了解人眼视觉探测方程的实验依据。决定人眼能否看清景物(目标)的三大要素是景物的亮度 L 、对比度 C 和景物对人眼的张角(分辨角) α 。

理论和实践也已证明,人眼能分辨景物细节的最小分辨角 α 为 L 和 C 的函数:

$$\alpha \leq K / (LC^2), \quad (1)$$

式中 K 为既定光电子成像系统(包括人眼)的视觉判据可信度档次(判读不确定度)。若用空间频率分

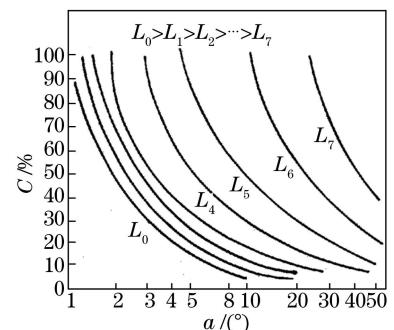


图 2 典型的人眼视觉特性曲线^[2]

Fig. 2 Typical vision characteristic curves of human eyes^[2]

辨率 R (其为分辨角 α 的倒数, 单位为 lp/mm) 表示, 则有:

$$R \leq CL^{1/2}/(2fK^{1/2}), \quad (2)$$

表 2 对视觉信噪比的要求档次

Table 2 Vision judge rank and their signal-to-noise ratio

Vision judge rank for signal-to-noise ratio	1	2	3	4	5
Uncertainty of vision judge	3.173×10^{-1}	4.55×10^{-2}	2.7×10^{-3}	6×10^{-5}	6×10^{-7}

式(1)、(2)中的 K 为常数, 由用户期望的系统视觉判读可信度决定, 对已设计调试好的成像系统, K 值要求愈高, 系统所能提供的像面景物分辨率就愈低; 反之, 对计划设计调试的成像系统, 若要 K 值愈高, 则只能按(2)式提升像面细节的对比度 C 、亮度 $L^{1/2}$ 及其相关参数性能, 才能有望达到预期的高分辨率视觉探测、识别或看清等指标要求。例如, 取 K 值或信噪比为 1 和 3, 则人眼识别目标的不确定度(失误率)分别达到 31.73% 和 0.27%。以上概念对理解微光遥感相机视觉探测方程的机理十分必要。

2.1.3 ICCD 微光遥感相机视觉探测方程

文献[1, 3]引用了一般光电子成像系统的能量链、调制传递函数(MTF)链和信噪比链等公式, 确认微光条件下目标像元之间光子数的对比度之差服从泊松统计分布规律, 推导出 ICCD 微光遥感相机的视觉探测方程为

$$R_a \geq \frac{2M(N)(D/f)}{K(1+\xi)[1+M(N)]} \cdot (\rho_0 E_0 \eta \sigma G m T \tau_{\text{atmosphere}}^R \tau_{\text{objective}} \tau_{\text{fiber}})^{1/2}, \quad (3)$$

式中 R_a 为像面分辨率, $M(N)$ 为光阴极面上空间频率为 N 时的调制度, D/f 为物镜相对孔径, ξ 为归一化噪声因子, E_0 和 ρ_0 分别为目标照度及反射率, σ 为色温 2856 K 光源的每流明光子数, η 为光阴极量子效率, G 为像管亮度增益, T 为荧光屏及 CCD 像元弛豫时间, m 为时间延迟积分级数, $\tau_{\text{atmosphere}}$ 、 $\tau_{\text{objective}}$ 和 τ_{fiber} 分别为大气、物镜和耦合光锥的透过率。 ξ 的求解公式为

$$n_{\text{ICCD}}^2 = n_{\text{Poisson}}^2 [1 + (n_{\text{thermal}}^2 + n_{\text{transfer}}^2) / n_{\text{Poisson}}^2] = n_{\text{Poisson}}^2 (1 + \xi), \quad (4)$$

式中 n_{ICCD} 为 ICCD 像元噪声, n_{Poisson} 为泊松(散弹)噪声, n_{thermal} 为热噪声, n_{transfer} 为电荷转移噪声。(4)式的物理意义为: 对于 CCD 及 ICCD 成像系统, 通常存在三种噪声源: n_{Poisson}^2 、 n_{thermal}^2 和 n_{transfer}^2 。由于 n_{Poisson}^2 易作理论处理, 故将其他两项噪声的平方和与泊松噪声的平方相除, 作归一化处理, 这样有利于对多探测器拼接遥感系统的噪声分布及其不同影响进行有效评估。

式中 f 为成像物镜(人眼)的焦距。经过大量实验得到公认的 K 值, 即对视觉信噪比的要求档次, 如表 2 所示。

不难发现, (3)式与(2)式十分相似, 这揭示了像面上的视觉分辨率正比于输入照度 E ($L = E/\pi$) 的 $1/2$ 次方, 反比于 K 和噪声归一化系数 $1 + \xi$; 不同之处在于, (2)式中用的是像面目标的对比度 $C(N)$, $C(N) = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / L_{\text{max}}$; 而(3)式中用的是像面的目标调制度 $M(N)$, $M(N) = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / (L_{\text{max}} + L_{\text{min}})$, 二者之间的关系为

$$C(N) = 2M(N) / [1 + M(N)], \quad (5)$$

$$M(N) = C(N) / [2 - C(N)]. \quad (6)$$

很显然, 用 $M(N)$ 替代 $C(N)$, 易于用线性系统 MTF 傅里叶分析理论进行像质分析。

(3)式与(2)式最大的不同还在于(3)式包含了景物、大气、物镜、探测器、显示器等整个光电成像系统各个环节的性能参数, 代入后可求得 R_a , 之后即可根据图 3 中遥感器的物镜焦距 f 和飞行器的飞行高度 H , 推算出遥感相机的地面分辨率和视场宽度, 计算公式为^[5-6]

$$\Delta X = \frac{H}{f} \Delta x, \quad (7)$$

$$W = n_{\text{element}} \Delta X = \frac{H}{f} n_{\text{element}} \Delta x, \quad (8)$$

式中 n_{element} 为 ICCD 像面视场像元个数; W 为地面覆盖视场宽度; Δx 和 ΔX 分别为相机物镜像面及对应地面的最小可分辨目标像元尺寸, $\Delta x = 1/(2R_a)$ 。

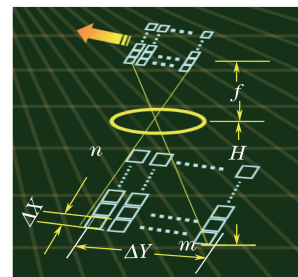


图 3 全色遥感相机推扫 CCD 阵列图

Fig. 3 CCD array map of full-color remote sensing camera

(3)式同样可用来分析 CCD 全色遥感相机的视觉探测问题, 只需将 Si-CCD 的相应参数直接替换公式中微光管的参数, 并令亮度增益 $G = 1$ 即可。

2.2 三类微光遥感视频器件性能比较

目前市场上共有三类微光遥感视频器件可供选择^[2],即 ICCD、电子轰击 CCD(EBCCD)和电子倍增 CCD(EMCCD),如图 4 所示。它们的器件结构、原理、特点及遥感实用性评价列于表 3 中。

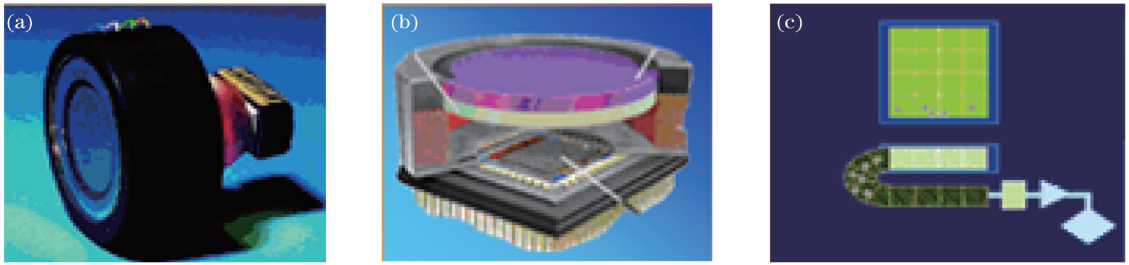


图 4 三类微光视频器件。(a) ICCD;(b) EBCCD;(c) EMCCD

Fig. 4 Three typical video frequency devices. (a) ICCD; (b) EBCCD; (c) EMCCD

表 3 ICCD、EBCCD、EMCCD 性能比较

Table 3 Performance of ICCD, EBCCD, and EMCCD

Device	Type	Feature	Comprehensive grade
ICCD	Intensifier/fiber optics /CCD	Tight structure, easy to made, medium K level	2A
EBCCD	Photocathode/electro-optic system /CCD	High electronic gain, high K level, complex fabrication process, high price	A
EMCCD	CCD with electron-avalanche multiplication	High electronic gain, high thermal noise level, low resolution	B

2.3 微光遥感相机性能测试和总体评价

为适应遥感相机总体性能评价分析的需要,目前国内有三种 ICCD 遥感相机测试分析和模拟仿真评价系统已研制成功或正在研发中,包括 ICCD 器件 16 项性能参数测试系统、投影仪式 ICCD 阵列拼接质量测试分析系统和微光遥感相机视觉探测模拟仿真评价系统。

2.3.1 ICCD 器件 16 项性能参数测试系统^[7-9]

ICCD 器件综合特性测试系统如图 5 所示。该系统是我国微光管及 ICCD 供应商——北方夜视公司昆明分公司,委托昆明阳海森工业装备技术

研究所和西安计算机软件团队,共同完成的 ICCD 综合特性测试项目初步联调任务。相关软件基于 Microsoft Visual Studio 开发,可以同时测量 ICCD 的 16 项参数性能,使用便捷,估计测量误差在 $\pm 10\%$ 以内,不确定度在 5% 以下。可测量的 16 项 ICCD 性能包括:光电转换 7 项参数(灵敏度、光谱响应、信噪比、光电转换特性、动态范围、紫外光日盲特性、抗光晕特性)、像质特性 4 项参数(MTF、调制度、分辨率、惰性)及几何特性 5 项参数(同轴度、放大率、畸变、亮度均匀性、视场清洁度)。

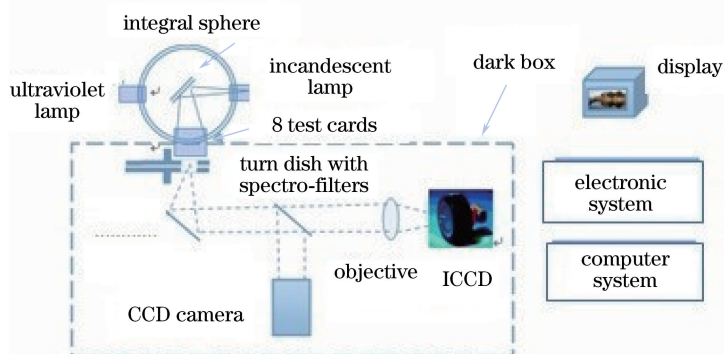


图 5 ICCD 器件综合特性测试系统示意图

Fig. 5 System diagram for testing ICCD performances

2.3.2 投影仪式 ICCD 性能测试系统

投影仪式 ICCD 性能测试系统的总体布局如图 6 所示,由高压汞灯-LED 投影仪、白色漫射荧幕、变倍成像物镜、被测 ICCD 器件(或 ICCD 相机)、标准 CCD 器件、监视器、电源/视频谱仪和计算机控制系统组成。

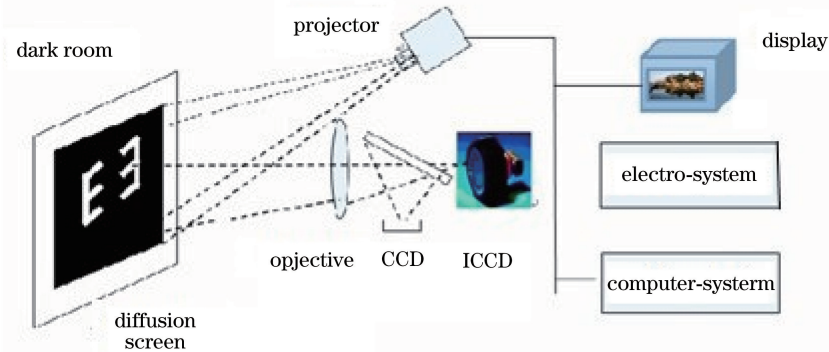


图 6 投影仪式 ICCD 性能测试系统总体布局

Fig. 6 Overall layout of performance test system for projector-type ICCD

2.3.3 投影仪式 ICCD 阵列拼接质量“心电图”测试分析系统

ICCD 拼接精度对遥感像质的影响如图 7 所示,投影仪式 ICCD“心电图”测试仪的创新之处在于,它可以在经校准的“五变”(变照度、变对比度、变

投影仪投出的靶标图像全部由计算机生成,经高质量漫射荧幕反射、变倍物镜及光路中 45° 半透半反镜光学系统后,清晰地成像于 ICCD 光阴极/标准 CCD 输入面上,并输出视频测试卡图像,供人眼通过监视器予以判读,给出 ICCD 器件(或相机)综合特性测试结果。

光谱、变频率、变速度)条件下,测量评估单块 ICCD 和多块 ICCD 的分辨率等 16 项性能参数,尤其是对它可以相机多块 ICCD 的 6 个自由度拼接精度 (Δx 、 Δy 、 Δz 、 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \gamma$) 进行“心电图”诊断和实时校正。

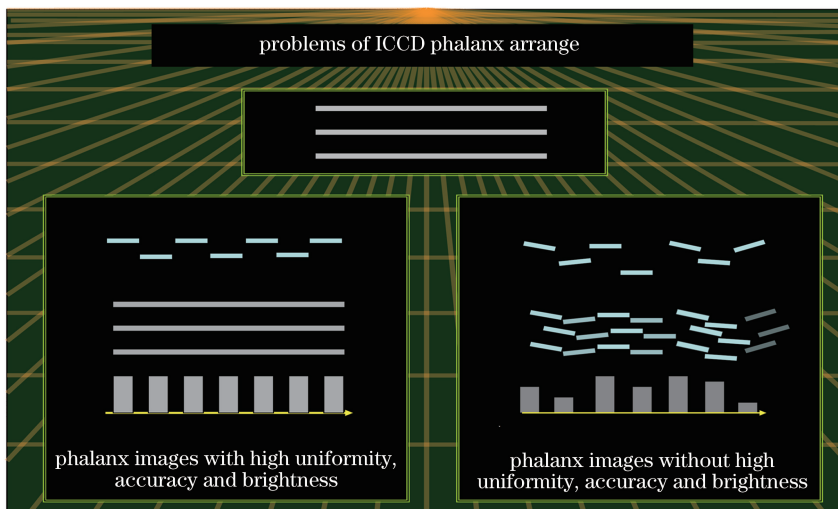


图 7 ICCD 拼接精度对遥感像质的影响

Fig. 7 Effect of ICCD stitching accuracy on remote sensing images

2.3.4 微光遥感相机视觉探测性能模拟仿真评价系统^[3,9]

ICCD 微光遥感相机总体性能模拟仿真评估系统(WGYG 2017)基于投影仪式 ICCD 性能测试系统和 MATLAB 程序开发,能依据输入的子系统和环境条件,以模拟仿真动画的方式,给出微光遥感系

统的地面分辨率和视场覆盖宽度等总体预期性能,可为遥感相机的设计、调试和应用提供实验依据。

WGYG 2017 的操作界面如图 8 所示,进入系统后,输入相关目标、大气、物镜、ICCD 探测器、视频采集和显示系统等多环节的性能参数,单击“start”,即可立即看到投影仪式 ICCD 性能测试系

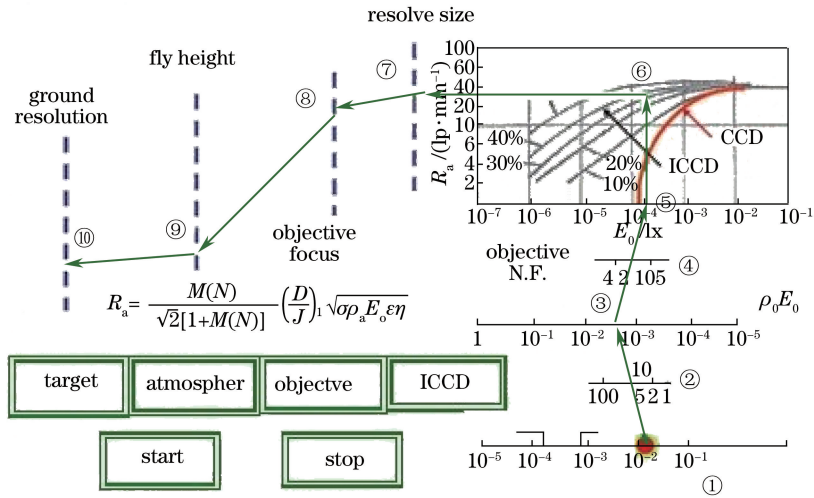


图 8 微光遥感总体性能测试及模拟仿真系统示意图

Fig. 8 Schematic of general performance test for low light level remote sensing and simulation system

统界面①~⑩的动画,逐步显示微光遥感相机的地面横向/纵向分辨率和视场覆盖宽度;此外,还可对多块 ICCD 拼接的 7 个自由度缺陷的“心电图”进行诊断和纠正,提供在线监控手段。

2.4 微光遥感相机 ICCD 相关元器件当前水平^[10-12]

ICCD 相关元器件包括微光管、光纤元件和 CCD,它们的性能优劣和质量控制是微光遥感相机研制工作中的关键环节。

2.4.1 三种微光管/CCD 耦合方式比较

如图 9 所示,微光管与 CCD 的耦合方式有三种:中继透镜耦合、光纤光锥耦合和光纤传输带耦合。三种方式各有优缺点,后两者的分辨率损失中等,且均存在 CCD 的前照明与后照明之分,前照明 CCD 受电极覆盖影响,有效接收光的能力受损;后照明 CCD 虽无此顾虑,但耦合间隙较大,总体耦合分辨率较低。目前,市场上以光纤光锥耦合的 ICCD 最为常见。

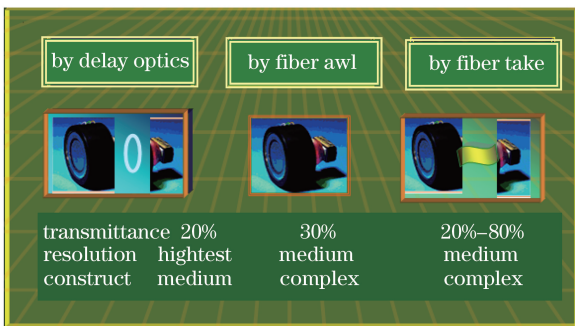


图 9 三种微光管/CCD 耦合方式比较

Fig. 9 Three types of couple methods comparison of low light level tube/CCD

2.4.2 微光遥感相机用 CCD 元件的优选^[8]

表 4 列出了加拿大 DALSA 公司线阵 CCD 的性能参数。该公司还提供了 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ CCD 转移噪声电子数 n_{transfer} 的相关数据:1000 electron/pixel(表面电荷耦合)和 100 electron/pixel(埋沟电荷耦合);有报道称,若采用同片放大器的 CCD(输出电容不大于 0.03 pF), $n_{\text{transfer}} = 69$ electron/pixel。

表 5 列举了 ICCD 相关的光子泊松噪声、光阴极热噪声、CCD 热噪声、单个像元 CCD 的转移噪声、1000 个像元的转移噪声和 19×1000 个像元的转移噪声水平($10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$)。

表 4 DALSA 公司线阵 CCD 芯片性能参数

Table 4 Performance parameters of line array CCD of DALSA company

Parameter	Value
Resolution	512/1024/2048/4096 (new)
Image element size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	14×14, 7×7 (new)
Sensitive area size /mm	7.2/14.4/28.7/57 (new)
Max frame frequency /kHz	73/37.8/19.2
Data frequency /MHz	40
Sensitivity / ($\text{V} \cdot \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	43.7
Dynamic range	1820:1
Pack construction	24-foot DIP
Work temperature /°C	≤60
Number mark	IL-P3-1024

表 5 ICCD 相关的光子泊松噪声、光阴极热噪声、CCD 热噪声、单个像元 CCD 转移噪声、1000 个像元转移噪声和 19×1000 个像元转移噪声水平

Table 5 Photon Poisson noise, thermal noise of photocathode and CCD, and CCD transfer noise in images of 1 pixel, 1000 pixels and 19×1000 pixels

Parameter	Poisson noise	Thermal noise of photocathode	Thermal noise of CCD	CCD transfer noise of 1 pixel image	CCD transfer noise of 1000 pixels image	CCD transfer noise of 19×1000 pixels image
Value	1.61×10^3	6.3×10^{-1}	6.3×10^3	10^2	10^5	1.9×10^6

转移噪声是限制 ICCD 遥感相机输出信噪比和观察性能的最大障碍,因为 1 个像元的转移噪声为 10^2 electron/pixel; 一行 10^3 个像元,转移噪声为 10^5 electron; 19 个 ICCD 拼接的阵列探测器的转移噪声为 1.9×10^6 electron。这就是提高 CCD 前端耦合微光管的输入信噪比和选购低转移噪声 CCD(同片放大器 CCD, 输出电容不大于 0.03 pF 时 $m_{transfer} = 69$ electron/pixel)的根本原因。

2.4.3 微光遥感相机用微光管的优选^[3,10]

图 10 高度概括了零代、一代、二代、三代微光器件光阴极灵敏度、器件分辨率、信噪比的当前国内外工业水平和极限水平。这是人们进行 ICCD 结构优化设计的重要依据。例如,(3)式在其他参数不变的情况下,若用灵敏度为 $1500 \mu\text{A}/\text{lm}$ 的三代微光 ICCD 代替灵敏度为 $500 \mu\text{A}/\text{lm}$ 的二代微光 ICCD,则其地面分辨率可提高 $\sqrt{3}$ 倍,即由原来的 1.732 m 改善为 1 m。

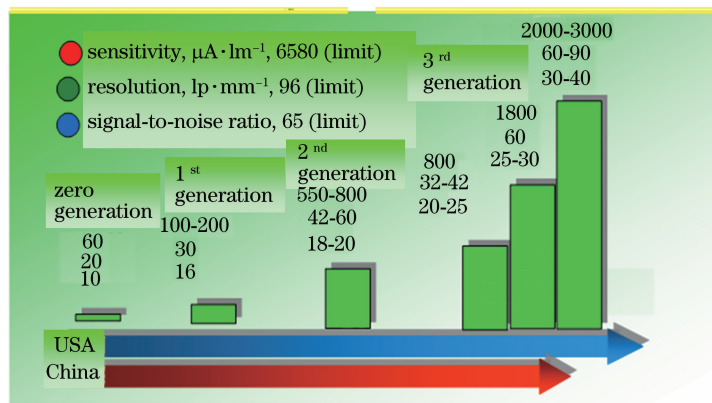


图 10 历代微光夜视技术性能比较

Fig. 10 Performance comparison of the low light level night vision technology in all generations

2.5 ICCD 同时完成微光遥感和光谱遥感的可能性探讨^[13-14]

若采用面阵 CCD 拼接成的 ICCD 阵列,有可能同时实现微光遥感和微光光谱遥感两项功能,即阵列的第 1 排 ICCD 承担推扫式微光遥感任务,后续各排 ICCD 依次分别接收由色散光谱仪投射的地面目标的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫单色光灰度信息,进而完成光谱分析成像任务。这种二合一的遥感方式需解决以下几个问题。

2.5.1 光谱遥感相机的光谱分辨率及其制约因素

面阵推扫 CCD 成像光谱仪的主要特性之一是其光谱分辨能力,即传感器记录所能分辨电磁波谱中的最小相对波长范围 $\Delta\lambda/\lambda$ 。一般而言,传感器光谱分辨能力的大小还需考虑其记录的波段数量和整体波长范围。通常可划分为 3 个档次:多光谱(5 个通道)、高光谱(几十个通道)和超光谱(几百个通道,波段宽度为 $5 \sim 10$ nm)遥感相机。

遥感光谱成像仪的相对光谱分辨率 $\Delta\lambda/\lambda$ 受两大因素制约:1) 单色仪或光栅等色散元件的光谱分辨率;2) 包括 CCD 探测器在内的成像系统的光谱分辨率。这里只讨论第 2 个因素,即 ICCD 能否替代 CCD 作为成像光谱仪的探测器。对于以光栅作为色散元件的成像光谱系统,光栅的相对光谱分辨率为

$$\Delta\lambda/\lambda = 1/(mN_G), \quad (9)$$

式中 m 为衍射级数, N_G 为光栅的刻线总数。可见, m 和 N_G 取值越大,光谱仪的相对光谱分辨率越好。这是现有遥感光谱仪始终追求的目标,它决定了遥感光谱仪光谱分辨能力的极限水平。这里需要重点考虑探测器信噪比对系统光谱分辨特性的影响。中国科学院上海技术物理研究所王建宇等^[11]提出遥感光谱仪中的色散元件和 CCD 探测器同样存在颜色判读误差的高斯型色散点扩展函数 $h(\lambda)$, $h(\lambda)$ 及其标准方差 σ 可分别表示为

$$h(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\lambda_d - \lambda_i)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lambda_d - \lambda_i)^2}, \quad (11)$$

式中 $\lambda_d - \lambda_i$ 为色散元件和探测器输出判读误差的范围; σ 为标准方差, 即除了正确判读为 λ_i 的光子以外, 其他 $n-1$ 个非 λ_i 光子数偏差的均方根, 其值的大小可指示高斯型分布曲线的“胖瘦”及判读误差的大小。

2.5.2 用 ICCD 同时完成微光遥感和光谱遥感任务方案的利弊

分析(10)、(11)式, 与空域和时域中的傅里叶分析相关。 $h(\lambda)$ 曲线如图 11 所示, 不妨称其为色域傅里叶分析的对象, 其物理含义注释如下:

1) 视景物某一单色光子群的波长为 λ_i , 光子数量为 n_i , 进入遥感光谱成像系统后, 先后被色散元件分光并被探测器识别。同任何测量(判读)过程相同, 不可能将输入的 n_i 个光子全部识别为同波长(λ_i)的光子群, 会有部分光子被误判为其他波长(λ)的光子群。这与光学系统空域对输入光子群的点扩展函数概念完全类似。

2) 如图 11 所示, 无论曲线是“胖”还是“瘦”, 它与 λ 轴所构成的面积均相等。这意味着所有输入的色域光子均被接收, 但真正能被正确辨色的 $\Delta\lambda$ 比例各不相同, $\Delta\lambda$ 越窄, 正确辨色的比例越大。通常取曲线峰值的 1/2 所对应的 $\Delta\lambda$, 作为最小可分辨波长间隔, 并定义 $\Delta\lambda/\lambda$ (波长间隔与当前波长之比) 为该系统的相对光谱分辨率。

3) σ 的大小受噪声干扰。以人眼为例, 白天看到的景象绚丽多彩, 而到晚上却黯然失色, 这是由人眼视神经受体温下细胞的热运动噪声(热噪声)限制造成的。当外界照明条件减弱时, 视觉系统信噪比降低, 热噪声成为主要干扰因素, 自然会使颜色判读误差变大, 这就是正常人眼白天能辨色, 而晚上却感觉漆黑一片的原因。再次观察图 1, 由于壁虎体温比人的体温低 $10\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$, 因此热噪声比人眼低 1~2 个量级。同理, 猫在晚上无需光照明, 既能以高空域分辨率逮到老鼠, 又具有较高的色域光谱分辨率, 不会莽撞乱窜。

4) ICCD 中微光管的光阴极比猫眼视网膜的热噪声还要低 2 个量级, 比 Si-CCD 低 6~8 个量级。因此, 在同等弱光输入条件下, ICCD 相机的信噪比远高于 Si-CCD。图 11 中, ICCD 的色域点扩展函数比 Si-CCD 更加尖锐, 颜色识别误判的概率更小, 即

$\Delta\lambda/\lambda$ 更优。因此, 若用面阵 ICCD 相机同时完成遥感光谱成像任务, 则会具有更大的技术优势, 而且可以节省遥感相机探测器光、机、电、算、控工程投入的大量人力、物力和财力。

5) ICCD 替代 CCD 作为遥感光谱成像探测器的不足之处在于: ICCD 由微光管/光锥/CCD 多级耦合而成, 其白昼照度下的 MTF 和极限分辨率不及全色相机中的 CCD。可以通过优选分辨率不小于 60 lp/mm 的微光管及尽量减小与光锥双耦合的间隙等措施, 提高 ICCD 的 MTF。

全色遥感相机中的 CCD 阵列拼接精度已达到国家标准(亚像元级)^[5], 而微光相机中的 ICCD 要达到这一拼接精度水平, 尚需一系列更精密的优选和调控。

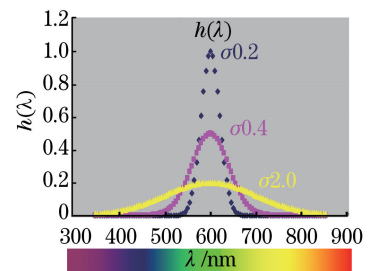


图 11 色域高斯型 $h(\lambda)$ 曲线

Fig. 11 Gauss $h(\lambda)$ curves in color area

2.6 ICCD 微光遥感相机标定和反演的两大技术难题

微光遥感相机输出并传输至地面接收站的图像信息, 是目标综合特性经过相机光学系统、探测器、电子学放大、A/D 转换后产生的数字序列, 无量纲。它可以作为图像灰度值, 供用户浏览或作定性分析。但这些信息是受到一系列外部和内部非理想条件下的干扰或影响后而产生的景物图像数据, 在几何形状、灰度层次、光谱分布及动像恶化等方面, 会发生一系列不同程度的畸变, 必须在实验室或星载标定的基础上, 通过 8 个畸变反演算法进行处理, 其中动像 MTF 恶化补偿和杂散光定标抑制是两大技术难题。

2.6.1 遥感相机动像 MTF 恶化补偿问题^[15]

1) 推扫相机动像 MTF 恶化补偿原理

相机在推扫遥感的过程中, 会观察到星外飞行器(导弹、飞船)和地面高速运动目标(飞机、汽车、舰艇等)相对于相机的运动; 加之载体在星载平台上发生的其他类型的抖动、晃动和随机振动, 都会使系统的 MTF 恶化, 图像会变得越来越模糊。因此, 应采取相应的电子稳像稳瞄措施, 予以反演补偿。

2) 推扫相机动像 MTF 恶化补偿反演算法

文献[3, 15]对光电成像系统动像 MTF 衰减

问题进行了系统研究,令遥感相机的弛豫时间为 τ ,星地相对运动速度为 v ,则其匀速动像下的MTF应为

$$M_{\text{output}}(N) = M_{\text{static}}(N) / (1 + 2\pi v\tau N)^{1/2}, \quad (12)$$

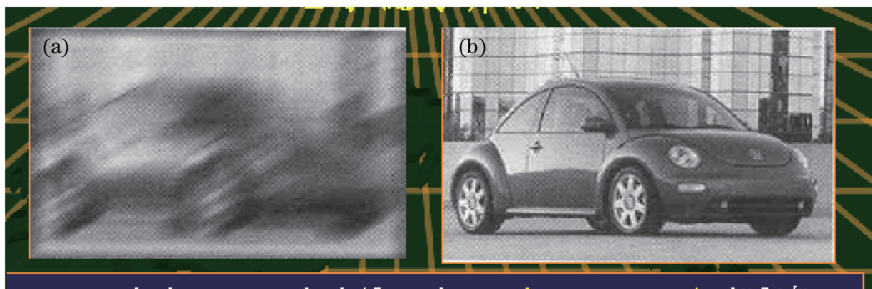


图 12 遥感相机动像模糊反演算法效果。(a)模糊图像;(b)清晰图像

Fig. 12 Effect of fuzzy inversion algorithm for dynamic image from remote sensing camera. (a) Fuzzy image; (b) clear image

2.6.2 遥感相机杂散光定标抑制问题^[5,13]

遥感相机视场内,除包含有用的目标辐射信息以外,还接收了来自机舱外部杂散光及实验室内或机舱内尚未消除的杂散光。这些杂散光在像面上会形成附加照度 ΔE_{stray} ,使输入图像的调制度降低,像质劣化。其中, ΔE_{stray} 与视场总照度 $E_{\text{max}} + E_{\text{min}}$ 之比被定义为杂散光系数 ϵ ,它对系统MTF的恶化影响可表示为

$$M_{\text{stray}}(N) = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}} + 2\Delta E_{\text{stray}}) = M_0(N) / [1 + 2\Delta E_{\text{stray}} / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}})] = M_0(N) / (1 + 2\epsilon), \quad (13)$$

式中 $M_0(N)$ 为系统静态无杂散光MTF, ΔE_{stray} 为杂散光附加照度。可见, ϵ 越大,图像的MTF下降越厉害。

遥感相机杂散光测试标定如图13所示,开启投影仪式ICCD性能测试系统,投射到反射率为零的靶标上,打开ICCD相机,测量像面光照度 ΔE_{stray} ,并与当前的无光照度 E_{min} 和有光照总照度 E_{max} 一同代入(13)式,则有

$$\epsilon = \Delta E_{\text{stray}} / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}}), \quad (14)$$

$$M_{\text{parasitic}}(N) = M_0(N) / (1 + 2\epsilon), \quad (15)$$

式中 $M_{\text{parasitic}}(N)$ 为系统含杂散光在内的MTF。

按(14)、(15)式评估 ΔE_{stray} 对系统MTF的不良影响,严格实施杂散光屏蔽,必须使 $\epsilon \leq 2\%$, $M_{\text{parasitic}}(N) \geq 98\%$ 。

2.7 ICCD微光遥感成像技术应用

2.7.1 3D微光遥感成像技术^[5,16]

基于激光雷达实现ICCD微光遥感3D成像的过程,即ICCD+激光雷达在对地面扫描过程中,采用发

式中 $M_{\text{static}}(N)$ 为系统静态MTF。对(12)式求得的输出调制传递函数 $M_{\text{output}}(N)$ 进行傅里叶逆变换,即可反演求得无动像模糊的景象空间分布。如图12所示,快速汽车模糊影像[图12(a)]经过反演修正后会变为清晰的图像[图12(b)]。

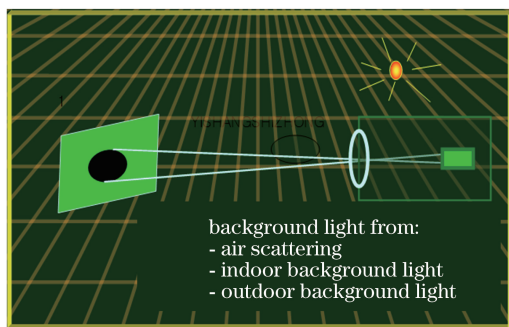


图 13 遥感相机杂散光测试标定示意图

射与接收同步的距离选通技术,回波信号(图14)既携带了被选通目标的空间图像信息 (x, y) ,又包含了目标与接收器之间的第3维距离信息,其距离值为

$$R = \frac{1}{2}ct, \quad (16)$$

$$\Delta R = \frac{1}{2}c \cdot \Delta t, \quad (17)$$

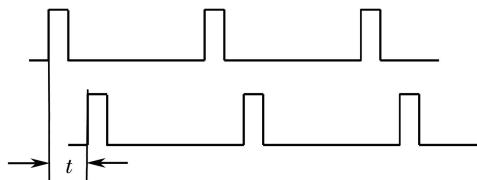


图 14 遥感雷达选通三维成像原理示意图

Fig. 14 Schematic of 3D imaging principle of remote sensing radar

式中 c 为光速, t 为回波时间, Δt 为回波时间差。很显然,要获得场景图像中的第3维立体层次感(ΔR)信息,只需解算出不同的 Δt ,借助可视化处理即可显示出来。

这种 3D ICCD 微光遥感相机的最大技术优势如下。1) 通过距离选通可以排除非选通距离内的杂光干扰,增大系统在恶劣天气环境下的作用距离。例如,本课题组于 1967 年完成的液氮制冷 GaAs 激光器/红外变像管选通夜视技术实验研究中,在浓雾霾天、能见度不足 10 m 的夜晚,通过选通和不选通

进行对比实验。实验结果表明,二者的夜视视距分别为 251 m 和 83 m。2) 如图 15 所示,海水只对蓝绿光有一定的透过率,其他波长的辐射几乎全部被吸收。这一特性使水下探测成像任务除了利用分辨率低的声呐以外,只能依靠蓝绿激光 ICCD 选通 3D 成像系统。

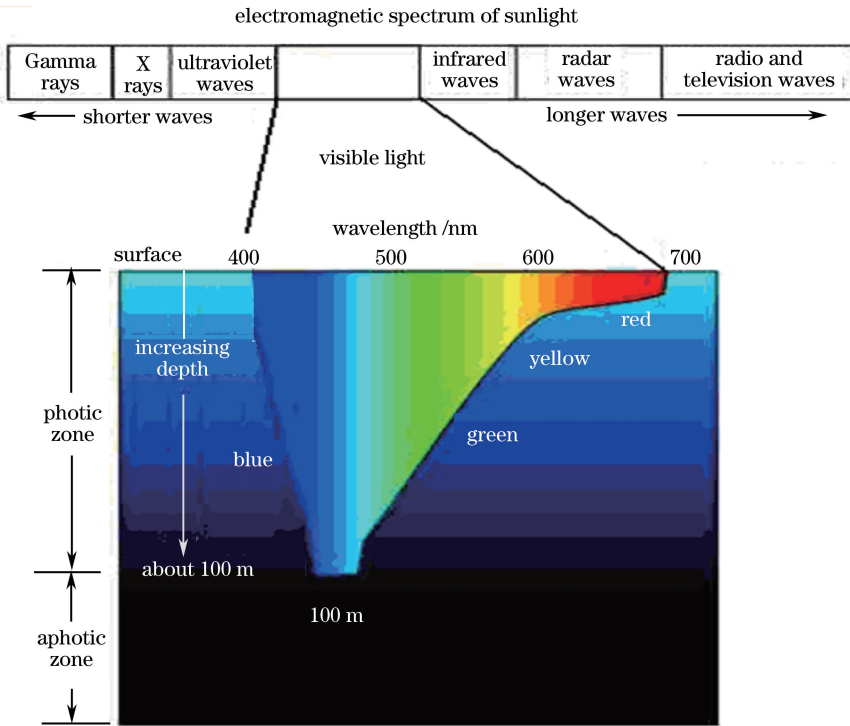


图 15 水下光学透过率光谱分布

Fig. 15 Spectral distribution of underwater optical transmittance

2.7.2 其他微光遥感技术应用^[16-18]

国外在 20 世纪 80 年代研制成功、90 年代装备使用的机载遥感探测雷达系统代表了这一领域的最高水平,包括:1) 加拿大和瑞典联合研制的“鹰眼”反潜系统和美国“魔灯”激光水雷探测系统,可探水深 30 m;2) 前苏联“紫石英”激光探测雷达系统,装于“熊 4 型”战机上,可探水深 45 m;3) 用于水下激光/ICCD 选通的成像系统,视距可达 150~200 m,可分辨小罐头筒尺寸的目标;4) 美国全天时 KH-12 卫星,可能装备了蓝绿激光/蓝延伸 GaAs 光阴极像管 ICCD 探测器。

2.7.3 星载/机载紫外日盲光阴极 ICCD 导弹告警系统^[11]

有一种只对导弹尾焰发处的紫外光敏感、对其他可见光日盲的紫外日盲光阴极 ICCD,将使用该探测器的遥感相机安装在预警卫星上,可与红外探测器协同构成双色导弹预警系统,实现昼夜兼容导

弹预警。美国从 1968 年开始发射预警卫星,采用红外探测器和电视摄像机。20 世纪 70 年代以来,发展了新型导弹紫外告警技术,可在远程导弹点火 90 s 以内探测到导弹的火焰,并能在 5 min 以内将警报送入战略防御指挥中心。在海湾战争中,该技术曾探测到伊拉克的“飞毛腿”导弹,为美军的“爱国者”导弹提供了 90~120 s 的提前拦截摧毁时间。

2.7.4 深空 γ 射线遥感探测(萨德)成像系统^[19-21]

人类对地球外层空间的探索,离不开对波长为 10~124 nm 的宇宙射线、 γ 射线及远紫外线敏感的探测成像系统。其中,最为先进的是一种已经用于深空等离子体分布探测的电荷耦合多阳极位敏光子计数视频器件(简称 CCMM 管)。如图 16 所示,CCMM 管是一种成像式位敏探测器。对于波长很短的高能光子,可以用几块微通道板(MCP)直接作为光电子转换器(量子效率为 10%~60%)及电子倍增器件,制成图像单光子计数器。其工作原理与

一般微光像增强器的不同之处是用楔条形阵列阳极代替像管荧光屏。CCMM管与EBCCD、真空多阳极微通道阵列管不同,管外的面阵电荷放大器代替了管内的CCD或多阳极阵列。通过对输出电荷二维空间分布的解算和可视化显示,提供被探测目标的空间动态位置信息。美国航空航天局已将其成功用于拍摄地球外层空间等离子体图像。相比于其他

位敏器件(电阻阳极、游标阳极、延迟线阳极及交叉线阳极),这种器件的主要技术特点是极短的波长响应(γ 射线、X射线)、高空间分辨率($150\ \mu\text{m}$)、极低的噪声(计数不大于 $0.4\ \text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)和快响应速度(毫秒级),而且是管外耦合,结构简单,性价比高,是用于航天星空 γ 射线、X射线探测成像及制导武器的先进器件。

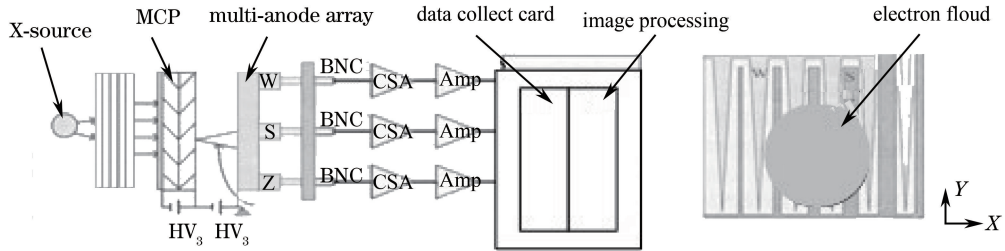


图 16 楔条形阵列阳极 γ 射线位敏探测器工作原理

Fig. 16 Principle diagram of γ -ray position sensitive detector with wedge array anodes

3 结束语

相比于可见光 CCD 遥感技术,ICCD 微光遥感技术是近些年发展起来的一种新技术,尚处于严格保密阶段。仅根据部分国内外情报资料和承研单位的研究论文,阐述了 ICCD 微光遥感相机的系统组成和工作原理,给出了将相机分辨率与系统能量链、MTF 链和信噪比链的数十个参数相关联的遥感相机视觉探测方程,为相机的研究和应用提供了理论依据;探讨了面阵 ICCD 同时作为全色遥感和光谱遥感探测器的技术可行性,但这有待实验考证;报道了 ICCD 相机在深空探测、制导等方面的研究动态。此外,报道了当前微光遥感相机性能测试评价方面的研究信息:1) 国内首次研制成功的 ICCD 综合特性测试系统可测量 ICCD 的分辨率、MTF 等 16 项参数,估计重复性误差在 $\pm 10\%$ 以内,不确定度小于 $\pm 5\%$;2) 提出了投影仪式 ICCD 相机总体特性测试系统原理方案,有助于在变照度、变对比、变频率、变颜色、变速度输入条件下,对相机的 16 项参数进行性能测试;3) 投影仪式 ICCD 阵列拼接质量“心电图”测试分析系统,能对相机多块 ICCD 的 6 个自由度拼接精度进行“心电图”诊断校正;4) ICCD 微光遥感相机性能模拟仿真评估系统能依据输入的子系统和环境条件,以模拟仿真动画的方式,给出微光遥感系统地面分辨率和视场覆盖宽度等总体预期性能,可为遥感相机的设计、调试和应用提供实验依据。

致谢 对中国科学院西安光学精密机械研究所、西

安应用光学研究所、兵器工业夜视集团昆明分公司、昆明阳汉森工业设备研究所和微光夜视技术国防科技重点实验室等单位为论文撰写所提供的支持和帮助表示由衷的感谢!

参 考 文 献

- [1] Harrison N J. Electro-optics handbook[M]. [S.l.]: Radio Corporation of America, 1974.
- [2] Csorba I P. Image tubes [M]. California: H. W. Sams, 1985.
- [3] 向世明,高教波,焦明印,等.现代光电子成像技术概论[M].2版.北京:北京理工大学出版社,2013.
- [4] 白廷柱,金伟其.光电成像原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
- [5] 尹占娥.现代遥感导论[M].北京:科学出版社,2008.
- [6] 张占睦,芮杰.遥感技术基础[M].北京:科学出版社,2007.
- [7] Tian X Q, Zhou W C, Peng Y, *et al.* Calibration technique of light beam quality measurement system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(s1): 365-368.
田小强,周文超,彭勇,等.光束质量测试系统标定技术[J].中国激光,2006,33(s1): 365-368.
- [8] Li X J, Ren J W, Liu H X, *et al.* Spectral response testing and uncertainty evaluation of plane array CCD [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 111202.
李晓杰,任建伟,刘洪兴,等.面阵 CCD 光谱响应测试及不确定度评估[J].激光与光电子学进展,2014,

- 51(11): 111202.
- [9] Committee of National Defense Science and Technology. General specifications of spaceborne CCD camera: GJB 2705—1996[S]. [S.l.]:[s.n.],1996.
国防科学技术工业委员会. 星载 CCD 相机通用规范: GJB 2705—1996[S]. [出版地不详]:[出版者不详], 1996.
- [10] Military specification: Image intensifier assembly, 18 mm, microchannel wafer: MIL-I-49428 [S]. [S.l.]:[s.n.], 1989.
- [11] 北京凌云光实数字图像技术有限公司. 图像和机器视觉产品手册[Z/OL]. <http://www.lusterinc.com>.
- [12] 北方夜视技术股份有限公司. NVT-产品介绍[Z].
- [13] 王建宇, 舒嵘, 刘银年, 等. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [14] Luo J, Liu D, Xu P T, *et al.* High-precision polarizing beam splitting system based on polarizing beam splitter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1210001.
罗敬, 刘东, 徐沛拓, 等. 基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1210001.
- [15] Xiang S M. MTF deterioration by image motion in electro-optical imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 1983, 3(9): 821-827.
向世明. 电光成像系统动象的 MTF 衰减[J]. 光学学报, 1983, 3(9): 821-827.
- [16] Weustrop D, Williams J T. The mosaic detector system[C]. 8th Symposium on Photoelectronic Image Devices, 1983.
- [17] Gleckler A D, Gelbart A, Bowden J M. Multispectral and hyperspectra, 3D imaging lidar based on the multiple slit streak tube imaging lidar[C]. SPIE, 2001, 4377: 328-335.
- [18] Xiang S M, Shi F, Guo H. Research on theoretical limit performances of the double-proximity-focusing image intensifiers[C]. SPIE, 2008, 6621: 662104.
- [19] Firmani C, Gutiérrez L, Salas L, *et al.* High spatial and temporal resolution imaging with a resistive anode photon counter[J]. Advances in Electronics and Electron Physics, 1985, 64(B): 331-336.
- [20] Du J B, Li D J, Ma M, *et al.* Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910003.
杜剑波, 李道京, 马萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910003.
- [21] 梅遂生, 王戎瑞. 光电子技术: 信息化武器装备的新天地[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2008.