



首都师范大学国家“双一流”建设高校项目资助

多模态传感器基元程控 成像技术与应用

周春平 宫辉力 著



科学出版社

多模态传感器基元程控 成像技术与应用

周春平 宫辉力 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍多模态传感器基元程控成像技术原理及其应用,详细介绍了图像传感器基础知识,提出了传感器基元程控理念,研究了多模态超级传感器的设计方法、采样模式,探讨了超分辨率图像重建、数字时间延迟积分、运动地物检测等关键技术,为新一代航天光学传感器研制提出了创新理念。

本书包含的部分研究成果是提高卫星空间分辨率和图像质量相关技术的知识创新和突破,该成果的应用将有助于我国航天遥感能力的提升。本书也可供各类从事航天遥感研究及应用的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多模态传感器基元程控成像技术与应用 / 周春平, 宫辉力著. —北京: 科学出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-03-058824-1

I. ①多… II. ①周…②宫… III. ①传感器—成像—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 212551 号

责任编辑: 王 运 白 丹 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京凌奇印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 16

字数: 380 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

本书详细介绍了图像传感器的基础,简要阐述了多模态传感器基元程控成像技术原理及其应用,提出了传感器基元程控理念,研究了多模态超级传感器设计方法、采样模式,探讨了超分辨率图像重建、数字 TDI、运动地物检测等关键技术,为新一代航天光学传感器研制提出创新理念。全书分为 8 章。

第 1 章,绪论。简要阐述了本书所涉及的基本概念和主要技术。

第 2 章至第 4 章,图像传感器。系统介绍图像传感器的原理、制造工艺、发展现状,重点对 CCD 和 CMOS 传感器的基本结构、性能、主要性能差异等方面进行阐述。

第 5 章,多模态 CMOS 传感器设计。分析多模态 CMOS 传感器设计中涉及的技术流程及重点环节,包括传感器设计概念、传感器设计、基元程控技术、传感器性能实现及优化、采样模式研究 5 个方面。

第 6 章,数字域 TDI-COMS 技术。本章重点对数字域 TDI-COMS 成像系统的基本概念、技术原理、自适应数字域 TDI 算法,以及成像系统的试验平台设计方案 4 个方面进行分析阐述。

第 7 章,基于序列图像的超分辨率处理技术。从国内外技术发展现状和三种超分辨率重构的主要技术方法等两部分对该处理技术进行分析。

第 8 章,多模态遥感图像运动地物检测与速度测算。重点对基于多模态遥感图像的运动地物从检测预先处理、自动检测、识别方法、速度测算 4 个方面进行分析论述。

周春平研究员和宫辉力教授拟定了全书的提纲,并负责各章节核心问题的凝练、梳理和最终审定。牛珂参与全书的统稿、审校和组织工作。其中,第 1 章由周春平和宫辉力完成。第 2 章至第 5 章由武大猷、周泉、王欣洋完成。第 6 章由陶淑苹、金光、曲宏松完成。第 7 章由沈焕锋、吕锡亮、曹近者等完成。第 8 章由时春雨、周春平完成。

本书内容主要基于首都师范大学成像技术高精尖创新中心的“多模态传感器基元程控成像技术与应用”科研项目成果。

感谢刘先林院士、李小娟院长、钟若飞教授、杨灿坤老师的无私奉献和大力支持!

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 图像传感器	1
1.1.1 CCD 传感器	1
1.1.2 CMOS 传感器	4
1.1.3 多模态传感器	7
1.2 多模态传感器基元程控成像技术	10
1.3 遥感图像超分辨率技术	11
1.3.1 基于地面图像的超分辨率处理技术	11
1.3.2 星地结合超分辨率处理技术	13
1.4 数字域 TDI 技术	14
1.5 可见光图像运动地物检测技术	15
第2章 图像传感器原理	19
2.1 固态图像传感器的发展	19
2.2 图像传感器材料	20
2.3 传感器工作原理	22
2.3.1 光电荷的产生	22
2.3.2 光电荷的收集	23
2.3.3 电荷转移及检测	26
2.4 传感器的噪声	27
2.4.1 固定图像噪声	28
2.4.2 时域噪声	31
2.5 光电转换能力	32
第3章 图像传感器制造工艺	35
3.1 单晶硅生长	35
3.2 半导体制造工艺	36
3.2.1 光刻技术	36
3.2.2 氧化生长和去除	38
3.2.3 硅的生长和刻蚀	38
3.2.4 介质隔离	39
3.2.5 杂质的注入	40
3.2.6 金属化	41
3.3 芯片的封装	42

第4章 CCD 和 CMOS 图像传感器	45
4.1 CCD 图像传感器	45
4.1.1 CCD 图像传感器结构	45
4.1.2 电荷的转移机理	47
4.1.3 掩埋型 MOS 电容结构	48
4.1.4 CCD 工作模式	49
4.2 CMOS 图像传感器	51
4.2.1 CMOS 图像传感器的基本架构	51
4.2.2 CMOS 图像传感器性能	54
4.2.3 实用技术介绍	61
4.3 图像传感器的比较和应用	67
4.3.1 图像传感器的比较	67
4.3.2 CCD 图像传感器的应用	68
4.3.3 CMOS 图像传感器的应用	72
第5章 多模态 CMOS 传感器设计	74
5.1 新传感器设计概念	74
5.2 多模态 CMOS 传感器设计	74
5.3 基元程控技术	75
5.4 传感器性能实现及优化	76
5.4.1 量子效率	77
5.4.2 信噪比	78
5.4.3 分辨率	78
5.4.4 图像帧率	78
5.5 采样模式研究	79
5.5.1 面向目标精细及暗弱特征提取的 MS-CMOS 传感器设计	79
5.5.2 基于传感器逐行控制的运动目标探测方法	80
5.5.3 基于传感器隔行控制的运动目标探测方法	81
5.5.4 基于传感器相邻区域控制的运动目标探测方法	81
5.5.5 基于传感器高频采样的运动目标探测方法	82
5.5.6 基于倾斜采样传感器斜模式的运动目标探测方法	83
第6章 数字域 TDI-CMOS 技术	84
6.1 概述	84
6.2 数字域 TDI-CMOS 成像系统	86
6.2.1 TDI 成像技术概述	86
6.2.2 CMOS 图像传感器的工作原理	89
6.2.3 数字域 TDI-CMOS 成像系统	91
6.2.4 数字域 TDI-CMOS 成像系统与 TDI-CCD 成像系统性能比较	92
6.3 数字域 TDI 成像技术原理	94

6.3.1 基本数字域 TDI 算法	94
6.3.2 自适应数字域 TDI 算法	105
6.3.3 数字域 TDI 图像信噪比数学模型	110
6.4 数字域 TDI 成像试验平台方案	113
6.4.1 实验平台硬件架构	113
6.4.2 数字域 TDI-CMOS 相机硬件设计	114
6.4.3 数字域 TDI-CMOS 相机软件设计	115
6.4.4 试验验证	118
6.4.5 主要技术指标验证	119
6.4.6 数字域 TDI 图像 SNR 模型验证	121
6.4.7 自适应曝光验证	123
6.4.8 自适应数字域 TDI 成像验证	124
第 7 章 基于序列图像的超分辨率处理技术	126
7.1 超分辨率重构方法	126
7.1.1 非均匀插值方法	126
7.1.2 插值后的处理方法	134
7.1.3 Landweber 迭代方法	138
7.1.4 带预处理的交替方向乘子方法	142
7.2 基于 L_0 正则化约束的图像超分辨率重建	147
7.2.1 引言	148
7.2.2 图像观测模型	149
7.2.3 超分辨率重建中的模糊函数	149
7.2.4 重建方法	154
7.2.5 实验与结果	157
7.2.6 总结	164
7.3 基于双边结构张量的局部自适应图像超分辨率重建方法	164
7.3.1 引言	165
7.3.2 MAP 超分辨率重建框架	165
7.3.3 常用的图像先验模型	167
7.3.4 局部自适应的超分辨率重建方法	170
7.3.5 实验与结果	173
7.3.6 总结	178
7.4 亮度-梯度联合约束超分辨率重建	178
7.4.1 引言	178
7.4.2 几何运动估计方法	179
7.4.3 重建方法	187
7.4.4 实验与结果	188
7.4.5 总结	192

第 8 章 多模态遥感图像运动地物检测与速度测算 194

8.1 图像运动地物检测与速度测算 194

8.1.1 相关技术现状 194

8.1.2 总体技术路线 200

8.1.3 数字图像处理相关概念 201

8.1.4 运动地物检测预先处理 203

8.1.5 运动地物自动检测 206

8.1.6 运动地物识别方法 216

8.1.7 运动地物速度测算 222

8.1.8 动画遥感图像 225

8.1.9 总结与展望 227

8.2 多模态遥感图像运动地物跟踪 232

8.2.1 相关技术现状 232

8.2.2 运动地物跟踪 234

参考文献 242

第1章 绪 论

1.1 图像传感器

图像传感器是获取视觉图像信息的基本元件，在信息系统中占有重要地位。图像传感器可以提高人眼的视觉范围，扩展视觉感知灵敏性，使人们观测到人眼无法直接分辨的微观世界、记录不可见光谱信息等。主流图像传感器为 CCD 和 CMOS，它们被广泛应用在数码摄影、天文学，尤其是光学遥测技术、光学与频谱望远镜和高速摄影技术，以及摄像机、数码相机和扫描仪中。

CCD 具有高解析度、低噪声、宽动态范围、性能稳定等优点，从消费级电子产品至航天级应用，CCD 产品曾经一度在高清图像传感产品领域处于垄断地位。大面阵的 CCD 一般为全帧型（full frame），采用逐行沟道转移的读出方式，曝光时需要配置机械快门。

而 CMOS 图像传感器采用电压逐行放大串行读出的方式，可按照卷帘和全局两种电子快门方式曝光成像，不需要机械快门。因此，在遥感卫星光学成像应用领域，CMOS 图像传感器在工作模式上存在先天的优势。

1.1.1 CCD 传感器

CCD 是实时传输遥感卫星获取遥感图像的主要敏感器件，对于航天遥感具有重要意义。CCD 能够把视场内的光学图像转化为电荷，并存储在相应的像素中，通过读出电路将存储的像元电荷读出，并用外围电路中的模数转换模块将其转换为数字信号。一个完整的 CCD 阵列是由一系列微小光敏物质（像素）组成的。CCD 上拥有的像素数量越多，能够提供的画面清晰度也就越高。随着半导体技术的发展，CCD 技术也随之得到迅速发展，从当时简单的 8 像元移位寄存器，到现在的已具有数百万、上千万乃至上亿像元。

CCD 于 1969 年诞生于贝尔实验室。科学家威拉德·博伊尔和乔治·史密斯因为发明了 CCD 而荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。相比于传统模拟成像，线阵 CCD 具有分辨率高、结构简单、造价低等优点，自 1986 年法国 SPOT 卫星首次成功搭载线阵 CCD 以来，利用 CCD 获取的遥感影像卫星越来越多。但随着对图像质量需求的提高，CCD 像元尺寸逐渐减小、信噪比低的问题日益凸显。

用于航天遥感成像的 CCD 发展历程如图 1.1 所示。CCD 从功能上可分为线阵 CCD、TDI-CCD 和面阵 CCD 三大类，也有一些其他特殊设计的 CCD。

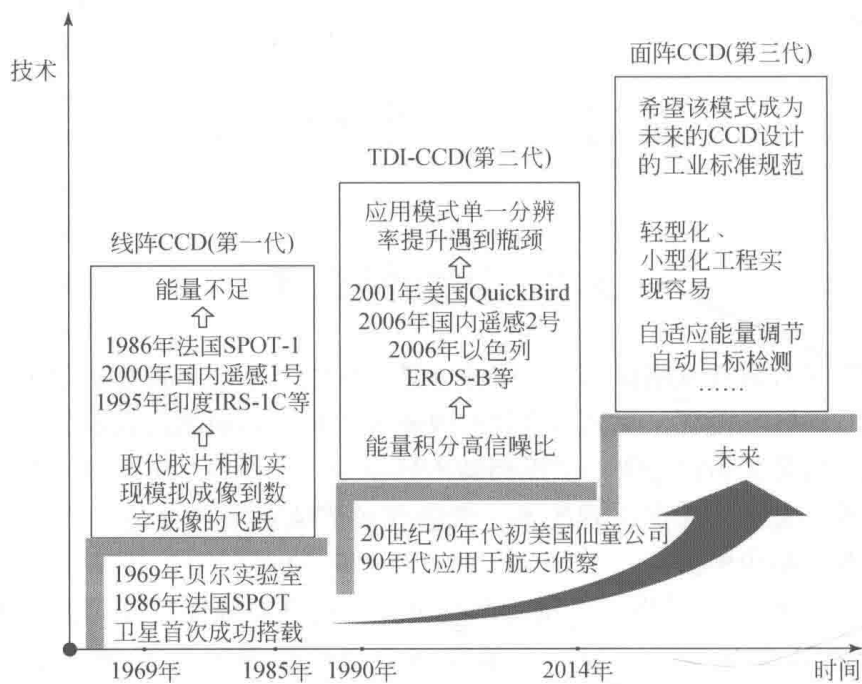


图 1.1 用于航天遥感成像的 CCD 发展历程示意图

1. 线阵 CCD

线阵 CCD 通常将 CCD 内部电极分成数组，每组称为一相，并施加同样的时钟脉冲。所需相数由 CCD 芯片内部结构决定，结构相异的 CCD 可满足不同场合的使用要求。线阵 CCD 有单沟道和双沟道之分，其光敏区是金属氧化物半导体（metal oxide semiconductor, MOS）电容或光敏二极管结构，生产工艺相对较简单。它由光敏区阵列与移位寄存器扫描电路组成，其特点是处理信息速度快，外围电路简单，易实现实时控制，但获取信息量小，不能处理复杂的图像。

伴随着遥感技术的发展，画幅式相机的垄断地位已被打破，线阵 CCD 成为对地球观测最为有效的传感器之一。线阵 CCD 传感器把许多微小半导体硅光敏固体元件，呈线状或面状阵列以极高密度排列在一起，并将其上面形成的光学图像转换成电信号，以线阵列器件作为接收元件，一般采用推扫式成像方式。

由于线阵 CCD 传感器是动态传感器的主流之一，搭载有这种传感器的卫星有很多，其分辨率和几何精度也在不断提高：1986 年法国成功地发射了 SPOT-1 卫星，首次获得分辨率为 10m（全色）和 20m（多光谱）的线阵 CCD 卫星遥感影像；1995 年印度的 IRS-1C 资源卫星顺利搭载了首颗分辨率突破 10m 的线阵 CCD 传感器；我国早期研究发射的卫星也搭载了线阵 CCD。

随着对图像分辨率需求的提高，CCD 像元尺寸逐渐减小，成像能量不足，严重影响了图像质量。为解决信噪比低的问题，TDI-CCD 应运而生。

2. TDI-CCD

为解决线阵 CCD 成像能量不足的问题,美国仙童公司在 20 世纪 70 年代初期提出 TDI-CCD 扫描成像技术,它利用时间延迟能量积分对同一目标成像原理增加光能收集,大幅度提高信号强度。与一般的线阵 CCD 相比,其具有很高的灵敏度和良好的均匀性。它的应用大大改善了星载相机的整体性能。由于 TDI-CCD 器件的制造成本高和制造工艺复杂,其一直没有得到广泛的应用。但是,由于 TDI-CCD 具有在不牺牲空间分辨率的情况下获得高灵敏度这个突出特点,其在高速、微光成像领域具有广泛的应用前景。所以,随着需求量的扩大和生产制造成本的降低,TDI-CCD 在 20 世纪 90 年代又焕发了新的生机。

TDI-CCD 基于对同一目标多次曝光,通过延迟积分的方法,大大增加光能的收集,与一般线阵 CCD 相比,它具有响应度高、动态范围宽等优点。TDI-CCD 的工作原理也与普通线阵 CCD 的工作原理有所不同,它要求行扫速率与目标的运动速率严格同步,否则就不能正确地提取目标的图像信息。在光线较暗的场所也能输出一定信噪比的信号,可大大改善环境条件恶劣引起信噪比太低这一不利因素。

鉴于上述优点,TDI-CCD 已被广泛应用于国内外航空航天高分辨率遥感器。美国仙童公司、艾特克 (ITEK) 公司等都研制了使用 TDI-CCD 的航空遥感器,美国的快鸟 (QuickBird)、观测镜 (EYEGLOSS) 和商业遥感系统 (CRSS) 等卫星上均采用了 TDI-CCD,德国和以色列联合研制的小卫星 DAVID 上也采用了 TDI-CCD。此外,韩国航空航天研究院研制的“韩国多用途人造卫星-2”(KOMPSAT-2) 卫星、以色列的 EROS-B1 ~ B6 等系列卫星也采用了 TDI-CCD 器件。目前,我国航天遥感器也采用了 TDI-CCD。

3. 面阵 CCD

面阵 CCD 的结构复杂,多个线阵 CCD 就组成了一个面阵 CCD,它由很多光敏区排列成一个方阵,并以一定的形式连接成一个器件,获取信息量大。面阵 CCD 可以在一次曝光中以任意的快门速度来捕捉动态对象,创建二维影像,其主要应用在高阶数码相机、保安监视器和摄录机等方面。

4. 其他新型 CCD

各国各方面相继投入巨资进行相关领域技术开发和应用方面的研究,并且竞争趋势日益激烈。CCD 的设计方式直接关系到相机成像的分辨率和图像质量。目前,国外面向不同领域的应用将多种设计方式应用于新型 CCD 以提高它的性能。

CCD 中每一像素的缩小将使得受光面积减少,感光度也将变低。为改善这个问题,20 世纪 80 年代后期,索尼在每一感光二极管前装上微小镜片,使用微小镜片后,感光面积不再由感测器的开口面积决定,而是由微小镜片的表面积决定。所以在规格上提高了开口率,感光度也因此大幅提升。

进入 20 世纪 90 年代后期以来,CCD 的单位面积也越来越小,1989 年开发的微小镜片技术已经无法再提升感光度,如果将 CCD 组件内部放大器的放大倍率提升,噪声也会被

提高，画质会受到明显的影响。索尼在 CCD 技术的研发上更进一步，对以前使用微小镜片的技术进行改良，提升光利用率，开发能使镜片形状最优化的技术，即索尼 super HAD-CCD 技术，以提升光利用效率来提升感光度。

在普通相机应用方面，为获得更高的精度，日本富士公司开发研制了超级 CCD (super CCD)。超级 CCD 诞生之前，普通 CCD 都是中规中矩的方形矩阵结构，而超级 CCD 与普通 CCD 最大的区别就是它八边形的感光点，以及旋转 45° 的排列方式，如图 1.2 所示。

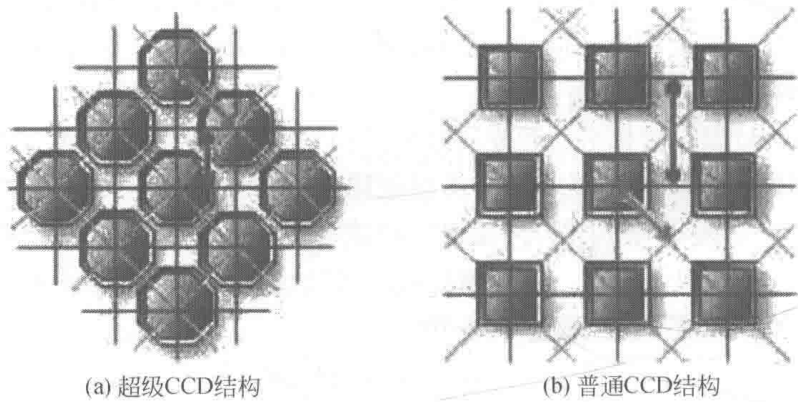


图 1.2 超级 CCD 结构示意图

由图 1.2 可见，超级 CCD 特殊的排列组合方式使得其成像单元在垂直和水平方向上的距离都很近，从而能够捕捉到更多纵向和横向上的视觉信息，还能获取更高的分辨率。

超级 CCD 的出现使很多领域注入了新的活力，最先研究该技术的富士公司竭尽全力对其进行研究并把它应用到产品中。不过，在实际产品应用中，虽然像素分辨率有所提高，但这种技术的可靠性还有待于验证，实际应用还没有达到预先期待的效果。

目前，国际上尚未查询到通过改变 CCD 像元形状实现超分辨率的技术。2007 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在探索项目研究中提出了异形像元 TDI-CCD 几何超分辨率方法，基于此方法，以目前我国红外 CCD 的制造水平，可以研制出适于空间高分辨率红外 CCD 相机的异形像元红外 CCD。

1.1.2 CMOS 传感器

CMOS 本是计算机系统内一种重要的芯片，保存了系统引导最基本的资料。CMOS 的制造技术与一般计算机芯片没什么差别，主要利用硅和锗这两种元素做成半导体，使其在 CMOS 上共存着带 N（带负电）和 P（带正电）级的半导体，这两个产生的互补效应所产生的电流即可被处理芯片记录和解读成影像。后来发现 CMOS 经过加工也可以作为数码摄影中的图像传感器，CMOS 传感器也可细分为被动式像素传感器与主动式像素传感器。

CMOS 具有便于大规模生产，速度快、成本较低的特点，其将是数字相机关键器件的发展方向。在日本佳能等公司的不断努力下，新的 CMOS 器件不断推陈出新，高动态范围

的 CMOS 器件已经出现,这一技术消除了对快门、光圈、自动增益控制及伽马校正的需要,使之接近了 CCD 的成像质量。另外,由于 CMOS 具有先天的可塑性,可以做出高像素的大型 CMOS 感光器而成本却不上升多少。与 CCD 的停滞不前相比,CMOS 作为新生事物展示出了蓬勃的活力。作为数码相机的核心部件,CMOS 感光器已经有逐渐取代 CCD 感光器的趋势,并有希望在不久的将来成为主流的感光器。

国际上,在成像质量方面,CMOS 图像传感器在噪声、灵敏度、响应均匀性等方面均已达到,甚至超越了 CCD,CMOS 图像传感器正在逐步取代 CCD 成为图像传感器的主流器件。例如,佳能最近推出的高端 CMOS 图像传感器实现了超低光照下 (0.03lx) 清晰成像。再如,美国 Vision Research 的高速相机 Phantomv 1610 采用 CMOS 图像传感器可实现百万分辨率下的 16000 帧频。在高灵敏度、高速和高分辨率成像领域,可以说 CMOS 图像传感器可以全面取代 CCD。

而将 CMOS 图像传感器应用于航天遥感,则具有以下优势:

- 1) CMOS 图像传感器采用电子快门,可大大提高静止轨道光学遥感仪器的可靠性;
- 2) CMOS 图像传感器集成度高,功耗低,无须特殊制冷措施;
- 3) CMOS 图像传感器抗辐照能力比 CCD 更好,适合长寿命在轨运行;
- 4) CMOS 图像传感器基于成熟的半导体制造工艺线,工艺可靠性高,成品率高。

由于具有优秀的抗辐照能力,CMOS 图像传感器在空间技术领域的应用也在不断拓展。CMOS 工艺中的栅极氧化层约为 CCD 工艺的十分之一,且杂质较少,因此,宇宙射线不易对器件产生永久损伤。例如,180nm 工艺下的 CMOS 图像传感器抗辐照度超过 70krad,约为 CCD 的 4 倍。另外,CMOS 器件可通过片上监控系统降低辐照影响,防止单粒子翻转。另外,CMOS 器件无须复杂的辅助支撑电路,无须机械快门和制冷装置,非常适合长寿命在轨运行。因此,CMOS 图像传感器在空间技术领域中的应用也正在逐步取代 CCD,其应用主要包括卫星遥感、飞行器上的星敏感器、太阳敏感器等。

另根据 YOLE DEVELOPMENT 的分析数据,2012 年 CMOS 器件已占领了 85% 的市场份额,其在民用和工业级应用中大范围取代了 CCD。虽然 CCD 技术在某些特殊技术上(如 TDI 图像传感器和科学级图像传感器)仍有独特的优势,但这些产品产量很小,难以维系整个 CCD 产业。在可预见的未来,CCD 很可能像胶片一样,成为被淘汰的成像技术。

由于图像传感器 CCD 技术逐渐消退,世界主要发达国家都陆续加大了对 CMOS 图像传感器的研发力度。例如,近年来美国航空航天局喷气推进实验室加大研发宇航级 CMOS 传感器,尤其是背照加工技术,以提升传感器的感光谱段和量子效率。2011 年欧盟委员会在 FP7 框架下设立 EURO-CIS 专项,用于构建基于欧盟境内的 CMOS 传感器产业链平台。同时,欧洲太空署于 2011 年年底开始两个重大专项 (HIGH-FLUXCIS 和 LOW-FLUXCIS),用以开发航天专用 CMOS 图像传感器技术。因此,未来的 5~10 年将会是 CMOS 图像传感器在航空航天等产品上全面超越 CCD 的黄金时期。在这样的大环境下,我国也应该把 CMOS 图像传感器列入我国亟须发展的战略性技术,加大投入力度,尤其是在高分辨率、高信噪比和高速 CMOS 图像传感器的研发方面。

在国内的高分辨率成像应用中,可采用多器件拼接,或焦平面微小位移的方式形成大面阵。但是,这些方式不光在成像精度上无法达到理想的效果,而且大多需要复杂的辅助

系统支持,这些复杂的机械构件增加了载荷在轨运行的风险。因此,大靶面、超高分辨率图像传感器现已成为该类遥感成像应用的主要研究方向。目前,国际上大部分超高分辨率面阵型图像传感器为 CCD,但是近年来随着 CMOS 技术的不断进步,尤其是 CMOS 图像传感器在电子快门、功耗、速度、抗辐照和可靠性上较 CCD 存在绝对优势。因此,开发用于静轨凝视的大面阵,具有超高分辨率的 CMOS 图像传感器已成为各国研发的热点。

中国于 2013 年 11 月宣布第一款超高分辨率产品 1.5 亿分辨率大面阵图像传感器一次流片成功,该图像传感器成为目前世界上分辨率最高的 CMOS 图像传感器——GMAX3005。该芯片采用 $5.5\mu\text{m}$ APS 像素, 30000×5000 分辨率,包含片上 ADC、PLL、温度和 SPI 控制,其电子卷帘快门可实现帧频 10 帧/s。

该芯片设计完全由我国独立自主开发完成,芯片加工由国外顶级封装厂完成;陶瓷封装壳由日本专业陶瓷壳生产商完成;带有高质量增透膜的玻璃盖片由欧洲专业玻璃镀膜公司生产。与同类产品 FTF122114M (Teledyne DALSA 公司推出的一款全色 CCD 图像传感器)相比,GMAX3005 在集成度、帧频、时域暗噪声、动态范围、量子效率、固态模式噪声和功耗上都具有明显优势,已达到国际领先水平。

信噪比是衡量图像传感器光电性能的最重要指标,高信噪比图像传感器意味着可以在光照较暗或者曝光时间较短的情况下得到同样清晰的图像,在微光成像、高速成像等领域有重要作用。为实现飞行器的高精度姿态控制,需要在一幅图片中实现对亮星和暗弱恒星信号的探测,达到 10 等星的探测精度。因此,需要采用高灵敏度、低噪声和高动态的图像传感器。目前,国际市场上尚无能够满足这一需要的 CMOS 传感器,而同类 CCD 因为抗辐照性能较差,难以满足空间长寿命要求。

在这种背景下,国内 2013 年启动了 GSENSE400 芯片设计,并于 2014 年年初一次流片成功,现已完成芯片全光电参数测试,并在 2014 年北京国际光电展览会上进行了产品发布和现场演示。根据芯片光电测试结果,其感光灵敏度达到了世界最高水平,其图像信噪比超过了同类 CMOS、CCD,甚至 EMCCD。GSENSE400 具有仅 1.7 个电子的读出噪声,高于 $30\text{ V}/(\text{lx}\cdot\text{s})$ 的灵敏度,具有极高的信噪比和动态范围,可广泛用于高精度星敏感器,也可用于微光夜视、天文探测,或者其他需要高信噪比、高动态的科研领域。

目前,正基于 GSENSE400 开发其背照式器件,背照式 GSENSE400 将进一步提升其信噪比,拓宽感光谱段,使其能够用于天文或日盲谱段检测,同时背照式器件优秀的光电特性也会进一步拓宽其在已有领域中的应用。与正照式 GSENSE400 光电参数对比,背照式 GSENSE400 芯片灵敏度预计提升超过 30%,可以更有效地提高感光信噪比。

另外,TDI 图像传感器通过对曝光信号进行逐行累加,可以有效提高传感器成像信噪比。由于 TDI 图像传感器的成像原理与 CCD 电荷转移机理完全一致,因此,一直以来,TDI 图像传感器大多采用 CCD 工艺制造,使用交叠栅电极结构,使电极间隙小到信号电荷能够平滑地过渡,以克服电极间隙势垒对电荷转移效率的影响。但这种器件结构的制造需要增加介质制造工艺步骤,制造复杂,与标准工艺不兼容,因此,在 TDI-CCD 图像传感器上无法集成其他处理电路,其通用性与灵活性差。

随着 CMOS 技术的不断进步,TDI-CMOS 图像传感器已在成像质量、功耗、抗辐照能力和片上功能方面达到或超过 TDI-CCD 图像传感器,并将逐步替代 TDI-CCD 图像传感器

成为航天航空应用的主流图像传感技术。然而,虽然 TDI-CMOS 图像传感器具有很大优势,在传统的 TDI 图像传感器应用中仍有局限,具体原因表现在:与一般 CCD 直接进行电荷累加不同,TDI-CMOS 图像传感器通常将每个像素的电荷信号转换为电压或数字信号,然后进行累加。而在电压或数字域进行信号累加时,相应噪声增加,同样累加 M 级,TDI-CCD 微光信噪比直接提升 M 倍,而 TDI-CMOS 图像传感器微光信噪比仅提升 $\sqrt{M}$ 倍。

1.1.3 多模态传感器

目前,国内外的研究单位和生产厂商相继研发出了新的图像传感器产品。我国极大的需求和技术水平也增加了我国发展新型图像传感器的紧迫性。特别是,面对我国航天遥感对图像传感器的迫切需求,急需发展一种具有高分辨率、高信噪比、能够实现如运动地物检测等多种功能的新型 CCD 或 CMOS。

推扫式遥感相机与地面景物之间存在较大的相对速度,使用普通面阵图像传感器拍照会出现拖尾、混叠、模糊和信噪比低的现象,为解决此问题,遥感相机多采用 TDI-CCD 作为图像传感器。TDI-CCD 利用电荷行转移、多级积分等方式匹配星地间的相对速度并提高成像信噪比,所以 TDI 技术是解决空间光学相机推扫成像的理想方式。目前,高分辨率成像应用,尤其是在航天光学遥感领域,普遍采用 TDI 技术,国内如天绘一号、嫦娥一号、嫦娥二号、资源三号遥感相机,均采用 TDI-CCD 技术。国外如美国的 IKONOS, QuickBird, WorldView, GeoEye 等商业卫星,以及法国的 Pleiades 卫星也都采用 TDI-CCD。

然而,随着航天 TDI-CCD 相机的应用,其固有的不足逐渐被人们所认识,如 TDI-CCD 成像系统结构复杂、电源种类繁多、费功耗、体量大、焦平面热控难度高、级数不可连续调整、实时调焦困难,需要调偏流机构配合像移补偿,只可单向扫描拍照等缺点制约了 TDI-CCD 相机的应用与发展。TDI-CCD 相机的这些不足之处是由 TDI-CCD 本身固有特点所决定的,不更换 TDI-CCD 图像传感器很难克服这些不足。于是,与 CCD 同时期诞生的 CMOS 图像传感器进入了航天相机研究者的视野。

CMOS 图像传感器以系统集成度高、功耗小、供电电源种类少、外围处理电路规模小、系统重量轻、使用灵活等优势在近些年逐渐受到研究领域的关注,成为研究热点。尤其是随着 CMOS 图像传感器制造工艺的进步,其成像质量与 CCD 不相上下,从而推动 CMOS 图像传感器迅速应用于数码相机、手机、平板电脑等成像设备中,随着 CMOS 应用的不断拓展和其生产工艺水平的进步,CMOS 有取代 CCD 成为未来主流图像传感器的趋势。

在航天应用方面,目前 CMOS 图像传感器已经应用于星敏感器、空间可视监控系统、可视遥感星跟踪器系统、飞船监视器、火星探测器和天体跟踪器中,在空间光学领域展现出了广阔的应用前景。然而 CMOS 图像传感器在推扫式遥感相机方面的应用还存在某些技术困难,这是因为 CMOS 图像传感器多为面阵结构,难以如 CCD 一样在其内部实现 TDI 功能,所以目前主流遥感相机仍以 TDI-CCD 构架为主。从 CMOS 图像传感器的特点可以看出,CMOS 更适合空间应用,而且恰好可以克服 CCD 成像系统的诸多不足。

MS-CMOS 是本书提出的一种传感器设计模式。该模式可以有效提升卫星图像的空间

分辨率，具有自适应暗弱信息获取、运动地物检测等拓展应用功能，并在其他硬件条件不变的情况下，可以使卫星载荷具备小型化、轻型化、工程实现容易等优点。

在 MS-CMOS 的结构设计中，区别于传统的单线阵 CMOS 和面阵 CMOS，该元器件由单线阵 CMOS 构成类似面阵 CMOS 结构，输出以单线阵 CMOS 为单位，通道独立。其原理如图 1.3 所示。

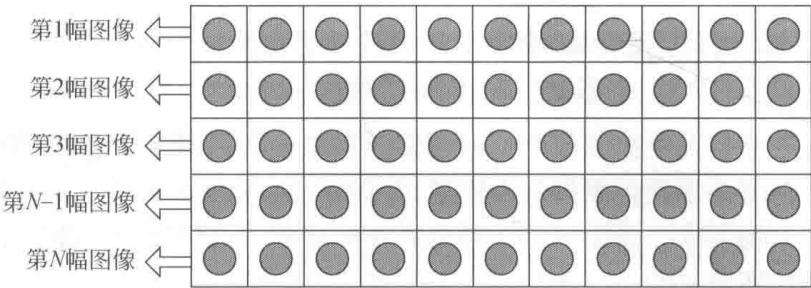


图 1.3 MS-CMOS 结构设计原理示意图

在对 MS-CMOS 的采样模式设计中，将 MS-CMOS 旋转后单像元错位排列，形成新的 MS-CMOS 应用模式，通过合理设置采样频率，可同时生成不同模式的序列图像，经图像重构、数字 TDI 和运动信息检测等处理，对生成的序列图像进行像元解混合能量积分，在保持高信噪比的同时，实现图像分辨率的提高，以及运动目标检测等拓展应用。

MS-CMOS 区别于传统的面阵 CMOS，是由多条单线阵 CMOS 组合增加列数组成，其结构组成与面阵 CMOS 相似，采样频率与单线阵 CMOS 相同，每条 CMOS 在采样时单独生成一副数字图像，则单次成像分别要生成 N 幅序列图像。

MS-CMOS 成像模式可用如下函数表示。

$$IM = F(N, M, \alpha, T, t_i)$$

- IM: MS-CMOS 成像模式;
- N : CMOS 列数 (纵向);
- M : CMOS 单行像元数 (横向);
- α : CMOS 旋转角度;
- T : 采样时刻;
- t_i : 积分时间。

- 1) 当 $N=1$ 时，MS-CMOS 模式可实现线阵 CMOS 功能;
- 2) 当 $T_1 = T_2 = \cdots = T_N$ 时，MS-CMOS 可实现面阵 CMOS 功能;
- 3) 当 $t_i=0$ 时，通过能量延时积分 (数字 TDI 处理)，可实现 TDI 功能。

MS-CMOS 区别于传统 CMOS 的最大特点在于可生成多幅序列图像，通过设置 MS-CMOS 成像方式，可实现多种应用。采样模式如图 1.4 所示。

将 MS-CMOS 倾斜，假设由 m 个 n 行的 MS-CMOS 倾斜构成成像 CMOS 阵列，则倾斜角度为 $\tan^{-1}\left(\frac{1}{n}\right)$ ，其中采样步长可设为原来步长的 $\sqrt{1 + \left(\frac{1}{n}\right)^2}$ ，采样频率与原来相比有所降低，可确保成像的曝光积分时间。每采样一次，后排的 CMOS 像元会在 X 轴或 Y 轴

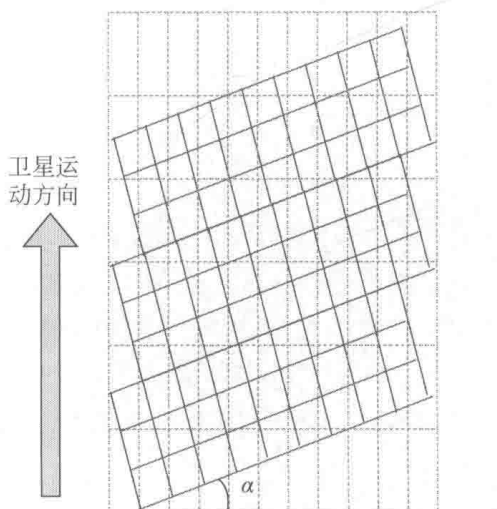


图 1.4 MS-CMOS 采样模式设计 1

(不包括 $\alpha=45^\circ$) 上与上排对应成像区域形成稳定的 $1/n$ 像元的混叠错位, 利用 MS-CMOS 的 n 排像元生成的 n 张错位图像, 可通过边界条件或目标函数进行解混求解, 进而提升成像分辨率。 $n+1$ 次采样后, 下一个 CMOS 对同一区域基本实现相同的成像, 对周期信号实现配准积分可实现信号能量的增强 (数字 TDI), 生成高信噪比的图像, 上述两个功能可以在卫星上通过图像重建等技术实现, 最终生成一幅高分辨率及高信噪比的图像; 在运动目标检测方面, 可利用生成的均匀错位序列图像, 通过分析序列图像对运动目标的表达效果, 综合实现对目标运动信息的检测。并通过平滑插值的方法提高运动信息检测的精度。

在分辨率提升方面, 根据 MS-CMOS 倾斜角度的不同, 采样频率和解混方法会有不同。如上式所示, 当倾斜角度等于 45° 时, $n=1$, 生成的序列图像数量为 1 张, 采样步长为 $\sqrt{2}$ 倍的原有步长, 基本没有提升分辨率, 因此, 需要将采样频率提高一倍, 通过解混可获得更高的分辨率。当倾斜角度不等于 45° 时, 则可根据生成的序列图像实现对 X 轴或 Y 轴的分辨率提升, 但提升单方向的分辨率不利于图像重建, 因此, 本书中需要对方位相和距离向双方向的分辨率提升进行方法研究。因此, 本书通过提升采样频率及倾斜一定的角度实现对图像双方向分辨率的提升。如图 1.5 所示, 与图 1.4 的排列方式要求相同, 但使用另一种采样方式, 可获得在距离向和方位向提升相同分辨率的通用公式。假设由 m 个 n 排的 MS-CMOS 倾斜构成成像 CMOS 阵列, 则倾斜角度为 $\tan^{-1}\left(\frac{1}{n}\right)$, 其中采样步长可设为原来步长的 $\frac{1}{\sqrt{1+n^2}}$, 即采样频率为原来的 $\sqrt{1+n^2}$ 倍, 则采样 $1+n^2$ 次为一个 $\sqrt{1+n^2}$ 周期,

在每个周期期间进行能量积分。分辨率在方位相和距离向分别提升为原来的 $\sqrt{1+n^2}$ 倍。例如, 当 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6\cdots$ 时, 分辨率可提升为原来的 $\sqrt{2}$ 倍、 $\sqrt{5}$ 倍、 $\sqrt{10}$ 倍、 $\sqrt{17}$ 倍、 $\sqrt{26}$ 倍、 $\sqrt{37}$ 倍等。