

Principle and Implementation of APS CMOS Star Tracker

APS CMOS 星敏感器 系统原理及实现方法

◎ 邢飞 尤政 孙婷 卫旻嵩 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

APS CMOS 星敏感器 系统原理及实现方法

Principle and Implementation of
APS CMOS Star Tracker

邢飞 尤政 孙婷 卫旻嵩 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

APS CMOS 星敏感器系统原理及实现方法/邢飞等著.
—北京:国防工业出版社,2017.4
ISBN 978-7-118-10925-2

I. ①A... II. ①邢... III. ①航天器-姿态飞行控制-敏感器件 IV. ①V448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 041779 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 插页 35 1/16 印张 16 字数 285 千字

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

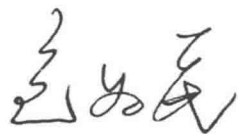
序

我国航天技术在近五十年特别是近二十年间取得了长足的发展,在遥感、导航、通信、载人航天和探月工程等领域都获得了举世瞩目的成绩,逐渐从航天大国向航天强国迈进。然而,在卫星的核心部组件和元器件方面的研制实力与欧美等传统航天强国还存在差距。星敏感器是卫星平台精度取得突破的一类重要核心器件,是目前卫星系统中姿态测量精度最高的部组件,在高性能卫星及航天器中具有广泛的应用,发挥着不可替代的作用。我国在高性能星敏感器研制方面还存在不足,一定程度上依赖进口。自2000年,我国仅从德国Jena公司进口的星敏感器就超过百台套,同时国外高性能星敏感器对中国有严格的禁运限制。这些成为阻碍我国航天技术进步的重要瓶颈之一。

国家高度重视高性能星敏感器等航天核心技术的创新研究。清华大学尤政院士所领导的团队,近十五年来致力于我国自主星敏感器的研究工作,在本领域取得了多项具有代表性的成果,获得了2009年北京市科学技术一等奖和2012年国家技术发明二等奖等奖励。清华大学研制的星敏感器体积小、重量轻、功耗低,星图识别速度快,抗干扰性强,在微小卫星及高精度遥感卫星领域具有特别的优势和广阔的应用前景。近年来,微纳卫星技术发展迅速,包括Google等多个高科技公司和若干著名民营企业已进军这一领域,特别是低轨遥感小卫星方面,以Planet Lab, Skybox, oneWeb, BlackSky等新兴卫星技术公司为代表,动辄有发送上百颗低轨小卫星的迫切需求。低成本、小型化的纳皮型星敏感器必然将在其中发挥重要作用。随着微光机电等技术发展,COTS器件的选用和低成本航天技术逐渐成为航天技术发展趋势,星敏感器微型化的潜力不可估量。

本书是作者十五年来创新性研究成果的总结和凝练,涵盖了设计、研制、测试及在轨应用等多方面内容,覆盖了星敏感器的整个生命周期。本书的实验部分亮点明显,理论与实验相结合,采用了大量的真实实验以及卫星的在轨实验数据,使得其说服力更强。同时,本书章节安排合理,每章针对一个星敏感器需要突破的核心问题,从原理到实现进行了重点阐述。在不失整体性的同时,创新突出,将纷繁复杂的方法总结成通用性的逻辑进行阐释,给读者豁然开朗的感觉。

希望本书中所提出的多项方法如图像处理、星图识别和精度测试等能够对我国从事星敏感器的研究和使用的读者提供有价值的启发和参考,并促进高性能星敏感器领域的发展和标准的建立。



2015.11.10

前言

星敏感器是一种以恒星作为测量参考基准的空间姿态敏感器,是迄今为止航天器上姿态测量精度最高的敏感器,具有无漂移、工作寿命长等优点,是航天器赖以生存和性能提升的基础性、关键性器件,在对地遥感、深空探测、空间攻防等航天应用中具有重要的战略意义。

星敏感器的发展大致经历了扫描式星敏感器、凝视电荷耦合器件(CCD)星敏感器和有源像素传感器(APS)星敏感器三代。扫描式星敏感器原理简单,识别星数目少,但因其具有转动部件,使系统寿命、可靠性受到影响,体积庞大且精度不高,除在后续的大气层内白天星敏感器上保留相应功能外,在卫星等应用中基本已淘汰;凝视 CCD 星敏感器是目前星敏感器领域的主流产品,在多颗卫星上广泛使用,但因其功耗、体积、质量都较大,且容易受到空间环境等干扰,在微纳卫星上使用较为困难;以 APS 互补金属氧化物半导体(CMOS)感光探测器为基础的新一代微型星敏感器是当前星敏感器领域的研究重点方向。

本书在国家安全重大基础研究计划(973)、国家高技术研究发展计划(863:2012AA121503)、国家自然科学基金(51522505,61377012)等的支持下,开展了 APS CMOS 星敏感器的新工艺、新机理和新方法研究,并针对微型航天器姿态敏感系统轻小型、高精度的特点,进行了基于 APS CMOS 技术的微小型星敏感器样机、系统、算法的研制,并按照我国航天规范进行了地面环境实验和在轨应用。课题组研制的微型 APS CMOS 星敏感器指向精度 $7''$,质量 1.1kg,功耗 1.3W,捕获时间 0.5s,并可以在月光或云层反射光等进入视场时保持正常工作,在精度与国际高性能星敏感器相当的情况下,将捕获时间和低功耗方面提升了近 1 个量级,显著提高了我国微小卫星的姿态测量水平。在此基础上,课题组又开展了 150g 纳型星敏感器、50g 皮型星敏感器等技术研究,并在我国首个微机电系统(MEMS)卫星任务中得到了应用,取得了令人振奋的实验效果。

本书从星敏感器的原理和基本方法入手,以某型号卫星的 APS CMOS 星敏感器及在轨应用的实验数据为基础,共包括 10 章,其中第一章主要介绍星敏感

器研究意义及发展现状,并对其工作原理和关键技术进行了简要介绍;第二章主要介绍星传感器的主要技术指标与各参数之间的关系,给出了星传感器的一般设计原则和基本方法;第3章主要介绍了 APS CMOS 星传感器成像系统设计原则,以及信噪比和星点滤波等方法,给出星传感器的星点提取方法和准则;第4章介绍了 APS CMOS 星传感器的光学成像系统的设计、指标间的关系等,重点介绍了星传感器的光学系统装调方法,并对温度等变化造成星传感器精度分析等技术指标进行了分析;第5章介绍了星传感器的标定方法,重点介绍了一种基于光学自准直原理进行参数解耦的标定方法,简单实用,且相比于传统方法精度更高;第6章重点阐述了基于流水线工作模式的星传感器星图识别方法;第7章主要阐述了星传感器的星图识别方法,在系统总结与提炼不同星图识别算法之间的本质运算逻辑的同时,提出了一种基于导航星域的快速星图识别方法;第8章主要介绍了一体化星传感器的测试系统与方法,包括实验室测试与真实星空测试;第9章主要介绍了星传感器的在轨实验,并着重分析了星传感器的在轨动态性能提升方法,同时对上述内容和主要技术指标进行了验证;第十章主要扩展介绍纳型星传感器的发展、研制、测试及在轨应用情况。

本书不仅系统介绍了 APS CMOS 星传感器的研制方法与系统实验,而且还简要概括了目前课题组所进行的纳型星传感器和皮型星传感器等系统的研究情况,使得整个研究体系和发展历程更加清晰明确。

本书的相关内容源于清华大学精密仪器系智能微系统实验室的长期研究实践,希望能够为国内大专院校及科研院所等相关研究提供参考。由于时间仓促及作者水平所限,书中难免有缺点和不足,恳请读者批评指正。

作者

2016 年 1 月

目录

第一章 绪论	1
1.1 APS CMOS 星传感器的研究意义	1
1.2 航天器姿态传感器综述	2
1.2.1 太阳传感器	2
1.2.2 红外地平传感器	2
1.2.3 磁强计	3
1.2.4 星传感器	3
1.2.5 惯性传感器	3
1.2.6 姿态传感器比较	4
1.3 星传感器工作原理	4
1.3.1 导航星	4
1.3.2 星传感器测量原理	5
1.3.3 星传感器的组成	6
1.4 国内外星传感器研究发展现状	6
1.4.1 国外星传感器发展现状	7
1.4.2 国内星传感器发展现状	9
1.5 微小型 APS CMOS 星传感器的关键技术	10
1.5.1 APS CMOS 技术	10
1.5.2 卷帘曝光成像方法	10
1.5.3 光学设计方法	11
1.5.4 星图滤波算法	12
1.5.5 实时的星图处理方法	12
1.5.6 导航星域和 k 矢量联合的星图识别方法	13
1.5.7 标定、测试与在轨验证	13

1.6 本章小结	14
第2章 微小型 APS CMOS 星敏感器系统原理	15
2.1 引言	15
2.2 APS CMOS 星敏感器关键技术指标分析与确定	15
2.2.1 APS CMOS 感光探测器的选择	17
2.2.2 视场和焦距的确定	18
2.2.3 敏感星等的确定	19
2.2.4 初始捕获时间和更新率	21
2.3 微小型 APS CMOS 星敏感器总体设计	22
2.3.1 星敏感器的总体构型	22
2.3.2 质量总体分析	23
2.3.3 功耗总体分析	24
2.3.4 总体技术指标和实现框图	24
2.4 本章小结	25
第3章 APS CMOS 星敏感器成像系统原理与方法	27
3.1 引言	27
3.2 目标星在探测器上的成像特征	27
3.2.1 光斑的形状和大小	27
3.2.2 恒星的特性分析	29
3.2.3 恒星的辐射能量分析	30
3.2.4 星敏感器感光性能分析与预测	31
3.2.5 分布到像素上的能量	33
3.3 APS CMOS 星敏感器感光探测器噪声分析	35
3.3.1 APS CMOS 感光探测器响应特性	35
3.3.2 APS CMOS 各种噪声分析	36
3.4 星点有效信号的滤波和提取	42
3.4.1 直接能量和滤波	42
3.4.2 能量相关滤波	43
3.4.3 星点判别和 DN 确定原则	46
3.5 APS CMOS 星敏感器图像的实验验证	46

3.5.1	利用小波进行图像分析的基本理论和方法	47
3.5.2	小波分析的噪声和理论计算噪声比较	49
3.5.3	小波去噪声算法和能量相关法滤波算法的比较	51
3.6	本章小结	53
第4章	APS CMOS 星敏感器光学系统设计与装调	55
4.1	星敏感器光学镜头指标参数	55
4.1.1	光学系统焦距和有效孔径	55
4.1.2	光学系统畸变	57
4.1.3	能量集中度和场曲	58
4.1.4	谱段和垂轴色差	58
4.1.5	镜头技术指标	59
4.2	光学系统的温度特性分析	60
4.2.1	温度变化影响	60
4.2.2	温度梯度影响分析	62
4.3	系统离焦范围分析	64
4.3.1	星敏感器光学系统的焦深	64
4.3.2	对离焦的分析与处理	65
4.4	APS CMOS 星敏感器的镜头结构	67
4.5	APS CMOS 星敏感器焦平面的安装技术	68
4.5.1	焦平面安装参数和要求	68
4.5.2	焦平面精密安装系统平台	69
4.5.3	焦平面的测量原理	70
4.6	本章小结	70
第5章	星敏感器的精度分析与标定技术	71
5.1	星敏感器标定方法概述	71
5.1.1	非设备性标定	71
5.1.2	设备性标定	72
5.2	星敏感器的标定参数及误差分析	72
5.2.1	噪声等效角	73
5.2.2	焦距误差对系统精度的影响分析	74

5.2.3	主点误差对系统精度的影响分析	75
5.2.4	像平面倾斜对系统精度的影响分析	77
5.2.5	光学畸变对系统精度的影响	78
5.2.6	单星点矢量精度传播模型	79
5.2.7	单星点精度的蒙特卡洛仿真	80
5.2.8	蒙特卡洛方法误差影响分析	81
5.3	星敏感器系统的标定方法	82
5.3.1	主点的标定方法	82
5.3.2	标定模型的建立	85
5.3.3	焦距和畸变的标定方法	86
5.3.4	倾斜角的标定方法	88
5.3.5	标定数据的综合利用方法	90
5.4	实验数据分析	92
5.4.1	误差分析与标定精度预估计	92
5.4.2	标定结果及讨论	93
5.5	本章小结	97
第6章	APS CMOS 星敏感器的成像控制与星点提取方法	98
6.1	引言	98
6.2	图像曝光和读出的流水	99
6.3	星敏感器的读出与星图滤波的流水	100
6.3.1	实现流水线滤波和星点提取的必要性	100
6.3.2	流水滤波的实现方法	101
6.4	基于硬件结构的星点信息提取算法	102
6.4.1	星点信息的提取原理	103
6.4.2	区域连接标签方法	104
6.4.3	在星敏感器中的星点信息提取的实现方法	108
6.4.4	星图识别算法的并行执行	113
6.5	本章小结	114
第7章	APS CMOS 星敏感器的快速星图识别方法	115
7.1	全天自主星图识别原理	115

7.1.1	概况	115
7.1.2	全天自主星图识别算法原理	116
7.2	基于角距匹配的星图识别算法	117
7.2.1	导航星表的建立	117
7.2.2	星对角距查找表的建立	119
7.2.3	星对的角距法搜索	120
7.2.4	三角形算法	120
7.2.5	多边形匹配法	122
7.2.6	极点法	123
7.2.7	角距法总结	123
7.3	基于栅格坐标匹配的星图识别算法	124
7.3.1	栅格法星图识别的原理	124
7.3.2	栅格数据库的建立	125
7.3.3	栅格法识别过程	127
7.3.4	栅格法的理论分析	130
7.3.5	基于极坐标的栅格法	132
7.4	基于导航星域的快速星图识别算法	135
7.4.1	星图识别方法的现状与问题	135
7.4.2	k 矢量(k -vector)介绍	137
7.4.3	星对角距的 k 矢量和 k 矢量查找表	138
7.4.4	利用 k 矢量法进行星对角距定位	139
7.4.5	直接比较法的星图识别	139
7.4.6	导航星域和 k 矢量联合法星图识别	142
7.4.7	全天星图识别算法的分析	145
7.5	递推模式的星图识别算法	146
7.5.1	递推星图识别算法原理	146
7.5.2	全天自主模式下的递推星图识别	147
7.5.3	跟踪模式下的递推星图识别	147
7.6	本章小结	149

第8章 星敏感器的地面测试与实验系统

8.1	引言	150
-----	----------	-----

8.2	全天球动态星模拟器测试系统	150
8.2.1	基于全天球动态星模拟器的测试系统总体架构	151
8.2.2	系统的安装与调试	151
8.2.3	模拟星图生成原理	152
8.2.4	实验系统的参数标定	154
8.2.5	星敏感器实验室测试实验	156
8.2.6	误差分析	158
8.3	星敏感器真实星空实验	160
8.3.1	真实星空实验方法	160
8.3.2	与精度测试方法相关的地球运动规律	160
8.3.3	星敏感器测量地球转动原理及系统坐标系建立	162
8.3.4	星敏感器精度测试实现方法	165
8.3.5	星敏感器精度评价标准	171
8.3.6	真实星空实验结果	173
8.3.7	基于真实星空的坐标极性测试及抗杂光性能测试	176
8.4	环境实验测试系统	181
8.4.1	热真空实验测试系统	181
8.4.2	振动等力学实验的星敏感器状态监测方法	182
8.5	本章小结	183
第9章	星敏感器在轨测试	184
9.1	引言	184
9.2	长时间星敏感器在轨姿态数据分析	184
9.3	星图效果分析	186
9.3.1	星图识别等功能分析	186
9.3.2	姿态运算分析与精度分析	186
9.4	卫星机动实验	190
9.4.1	卫星机动过程实验	191
9.4.2	卫星机动过程中动态星图处理方法研究	192
9.4.3	真实在轨星图分析和处理结果	198
9.4.4	星敏感器高动态跟踪算法研究及高动态性能地面验证实验	204
9.5	微型星敏感器在轨评估软件	206
9.6	高精度高动态星敏感器应用情况	207
9.7	本章小结	208

第 10 章	纳型星敏感器及其在轨测试	209
10.1	引言	209
10.2	微纳卫星	209
10.2.1	微纳卫星概念和特点	209
10.2.2	微纳卫星姿态控制实现方法	210
10.2.3	星敏感器在微纳卫星中的作用	211
10.3	微纳星敏感器	212
10.3.1	微纳星敏感器的发展	212
10.3.2	纳型星敏感器总体设计	214
10.3.3	纳型星敏感器总体技术指标	215
10.3.4	纳型星敏感器地面测试	215
10.4	纳型星敏感器在轨应用	218
10.4.1	卫星姿态与角速率确定方法	219
10.4.2	卫星指向确定方法	220
10.5	本章小结	222
展望		223
参考文献		225

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research significance of APS CMOS star trackers	1
1.2 Overview of spacecraft attitude sensors	2
1.2.1 Sun sensors	2
1.2.2 Infrared earth sensors	2
1.2.3 Magnetometers	3
1.2.4 Star trackers	3
1.2.5 Inertial sensors (gyroscopes)	3
1.2.6 Comparison of different attitude measurement sensors	4
1.3 Operation principle of the star trackers	4
1.3.1 Navigation stars	4
1.3.2 Measurement principle of the star trackers	5
1.3.3 Constitution of the star trackers	6
1.4 Present researches and developments of star trackers	6
1.4.1 International researches and developments	7
1.4.2 Domestic researches and developments	9
1.5 Key technologies of miniature APS CMOS star trackers	10
1.5.1 APS CMOS image detectors technology	10
1.5.2 Rolling shutter imaging method	10
1.5.3 Optical design method	11
1.5.4 Filtering algorithm of the star image	12
1.5.5 Real-time star image processing method	12
1.5.6 Star identification method with navigation star and k vector	13
1.5.7 Calibration, measurement, and in-orbit verification	13
1.6 Summary	14