

高分辨率光学卫星 敏捷姿态控制技术

Agile Attitude Control Technology for
High Resolution Optical Satellite

常琳 范国伟 杨秀彬 王绍举 编著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

高分辨率光学卫星敏捷 姿态控制技术

常琳 范国伟 杨秀彬 王绍举 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书针对光学成像卫星,介绍几种典型的成像模式、姿态控制相关的测量和执行机构部件,设计一些典型的姿态控制方法;并针对几种典型成像模式,采用一定的姿态控制策略,进行成像过程仿真。本书提供的方法能够为航天工程领域光学遥感卫星成像设计提供技术支持,可用于在轨成像过程控制。

本书既可供对地观测卫星先进控制技术的年轻科技工作者参考,也可供高等院校高年级相关专业研究生和科研院所的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率光学卫星敏捷姿态控制技术/常琳等编著.

—北京:国防工业出版社,2019.6

ISBN 978-7-118-11825-4

I. ①高… II. ①常… III. ①高分辨率-小型卫星-姿态控制 IV. ①V474.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 084760 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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12 插页 8 字数 222 千字

2019 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 72.00 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

序

自 1957 年苏联第一颗人造卫星发射成功至今,空间科学研究已经走过了辉煌的 60 多年。空间遥感技术已经在通信、导航、对地观测、气象预报、环境保护、灾害监测和资源探测等方面发挥着重要作用。世界各国都希望能够借助空间遥感技术为国家经济的发展与建设提供强大的推动力和重要的战略决策依据,空间遥感技术因此在各国得以迅速发展,也越来越显现出其深远的军事意义和巨大的经济效益。空间遥感技术的发展水平,已经成为衡量一个国家科技实力和创新能力的重要依据。

随着航天技术的发展,当前对地观测卫星表现出高分辨率、轻小型化以及敏捷型姿态控制三个主要发展趋势。敏捷的姿态机动能力可以保证小型卫星从一个目标区域观测完之后能够迅速机动到另一个目标区域,在不增加星体的质量、体积及能量消耗的前提下采集到更多的科学数据,极大地提高整星的功率密度,进而降低研发成本。姿态控制系统是对地观测卫星的主要分系统之一,主要功能是实现卫星对地面目标的快速、精准、稳定指向。卫星姿态控制系统根据传感器测量的姿态信息,通过设计的姿态确定及控制算法来驱动姿态执行机构,实现卫星姿态的机动及稳定闭环控制,进而保障载荷的精确对地指向,实现高分辨率侦察、城市规划、农田水利服务、应急观测等军、民空间遥感任务。

卫星的敏捷姿态控制具有典型的多约束、非线性及强耦合特点,特别是在卫星姿态进行快速机动情况下,系统的挠性将逐渐加剧,这些问题的存在给姿态控制系统的设计带来了巨大的困难与挑战。为实现高性能的卫星姿态控制,需要从动力学及运动学建模、姿态控制部件、定姿算法、控制算法和仿真验证等全链路的角度进行深入的分析与设计。本书以对地观测卫星的姿态控制技术为研究对象,详细介绍了卫星的敏捷姿态动力学及运动学模型,在介绍了几种星载姿态敏感器及执行机构基础上,阐述了当前主流的姿态确定算法,并就以飞轮或控制力矩陀螺为执行机构的敏捷卫星,详细介绍了卫星的敏捷姿态控制算法和控制力矩陀螺的操纵律,通过建立的仿真系统验证了相关控制理论。相信本书的出版对当前敏捷卫星姿态控制技术的提升有很大的帮助。

本书是航天光学遥感领域的一部较新的著作,本书的编著者都是长期从事

航天遥感、卫星姿态控制、综合电子学设计与仿真分析的一线科技工作者,有着深入的理论基础和工程经验。在本书的撰写过程中,编著者收集了大量、丰富的文献和资料,通过认真的分析和总结完成了本书的编写工作。该书不仅详细介绍了敏捷卫星的先进姿态控制方法,还结合仿真和实验等进行了相关理论的验证,使读者以更加直观、易懂的方式掌握本书的姿态控制基本理论,可读性较强。

本书在总结当前国内外敏捷卫星发展现状基础上,重点论述了对地观测卫星的敏捷型姿态控制方法,并结合仿真加以验证。本书内容由浅入深、内容丰富、重点突出、覆盖全面。对于需要快速学习对地观测卫星先进控制技术的年轻科技工作者来讲,本书很有参考价值,也可供高等院校高年级相关专业研究生和科研院所科研人员参考。

金光

2019年2月

前 言

高精度的对地观测分辨率可以获得更多的目标信息,已成为当前对地观测卫星发展的主流趋势。然而,高精度的对地观测分辨率常意味着相对较小的视场孔径角,而实现对敏感区域大范围的观测就应使卫星能够快速频繁地进行姿态机动,这就要求卫星平台具备敏捷的姿态机动能力。卫星的敏捷性主要体现在卫星姿态的快速机动能力及高精度的稳定能力两个方面,尤其在卫星对地观测多种工作模式理念提出之后,这种敏捷性需求更加迫切。为实现对敏感区域大范围拍照、一次过境多次拍照或不同目标区一次拍照,卫星需进行同轨条带拼接、立体或凝视成像等,在这些工作模式实现过程中必然伴随卫星姿态的前摆、后摆或侧摆运动,卫星在不同姿态之间快速切换,这样可以在一个轨道周期内采集到更多的科学数据,极大地增加整个小型卫星的功率密度。

本书将从对地观测小型卫星的敏捷姿态控制理论出发,对高性能姿控部件、姿态确定算法、姿态控制算法以及地面仿真技术等方面进行深入的分析。全书共分为7章:第1章对当前国内外敏捷小型卫星的发展情况进行了概述,并总结了敏捷型小型卫星的未来发展趋势;第2章介绍了敏捷小型卫星的姿态描述方法,并给出了面向控制需求的姿态动力学及运动学模型;第3章介绍了高性能的姿态测量部件,以及当前小型卫星常用的姿态执行机构,包括磁力矩器、飞轮和控制力矩陀螺,并对其工作原理进行了阐述;第4章介绍了几种小型卫星在轨敏捷姿态确定算法,实现了卫星在轨的真实姿态测量和估计;第5章详细介绍了小型卫星实现敏捷姿态快速机动及稳定控制的若干姿态控制算法;第6章针对以控制力矩陀螺为姿态执行机构的小型卫星,阐述了几种当前主流的操纵律设计方法;第7章详细介绍了小型卫星的敏捷地面仿真技术,包括全链路数学仿真和实物仿真,并给出了多种成像模式下的姿态仿真结果。

本书是在我们团队的共同努力下完成的,参与本书资料整理、章节编写、校对审核和技术支持的人员有常琳、范国伟、杨秀彬、王绍举,同时,要特别感谢孙志远、杜丽敏、王亚敏、周美丽、朴永杰、章家保、冯汝鹏、王家骐院士、金光、徐伟、曲宏松、刘春雨、张贵祥、李宗轩、徐明林、刘帅、徐婷婷、徐超等对本书写作的帮助。在本书的编写过程中,始终得到中国科学院长春光学精密机械与物理

研究所学术委员会主任、中国科学院院士王家骥研究员的关注、指导和支持,并为此书作序,在此特向王家骥院士表示衷心的感谢。空军第二航空学院、北京理工大学、长春理工大学、清华大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、深圳航天科技创新研究院等兄弟院校航空航天领域的专业老师们提出了许多宝贵的意见和建议;国防工业出版社的领导和编辑予以直接指导与帮助,特别是国防工业出版社编辑肖姝为本书的出版做了许多艰苦细致的工作。借此书出版之际,谨对上述领导、专家和朋友们一并表示深深的感谢。

小型卫星的敏捷姿态控制技术包含控制、电子、机械等多学科的系统工程,由于我们的水平所限,难免有错误和不妥之处,欢迎专家和读者批评指正。

常 琳

2019 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 敏捷型对地观测卫星发展现状	2
1.1.1 敏感型卫星的成像模式	2
1.1.2 典型的敏捷型卫星计划	6
1.2 敏捷型对地观测卫星发展趋势	12
参考文献	13
第 2 章 卫星姿态动力学及运动学模型	15
2.1 引言	15
2.2 姿态描述	15
2.2.1 方向余弦阵	15
2.2.2 欧拉角	16
2.2.3 四元数	17
2.2.4 罗德里格斯参数	18
2.3 参考坐标系定义	19
2.4 刚性卫星姿态动力学与运动学	19
2.5 挠性卫星姿态动力学	21
2.6 空间环境力矩模型	21
2.6.1 重力梯度力矩	21
2.6.2 地磁力矩	22
2.6.3 气动力矩	22
2.6.4 太阳光压力矩	23
参考文献	23
第 3 章 卫星姿态测量部件及执行机构	24
3.1 引言	24

3.2	01/数字一体化太阳敏感器	24
3.3	星敏感器	27
3.4	磁力矩器	29
3.5	反作用飞轮	32
3.5.1	电流模式的模拟量数学模型	33
3.5.2	采用数字电路后的数学模型	33
3.6	控制力矩陀螺	34
	参考文献	36
第4章	卫星姿态确定技术	38
4.1	引言	38
4.2	双矢量定姿	38
4.3	角速度积分定姿	42
4.4	星敏感器和陀螺联合滤波定姿	43
4.4.1	滤波状态变量及状态方程	44
4.4.2	陀螺漂移误差模型	45
4.4.3	状态方程线性化	46
4.5	基于扩展卡尔曼滤波算法的姿态确定	47
4.5.1	系统方程的建立	47
4.5.2	测量方程的建立	49
4.5.3	滤波器设计	49
	参考文献	51
第5章	卫星姿态控制技术	52
5.1	引言	52
5.2	PD+前馈补偿的控制方法	52
5.3	基于递阶饱和的瞬时欧拉轴快速机动算法	52
5.3.1	星体转动的误差角估计算法	53
5.3.2	基于瞬时欧拉轴的机动控制器设计	54
5.4	基于准滑模的快速机动控制	55
5.4.1	SMC 定义	55
5.4.2	基于准滑模的快速机动控制设计	56
5.4.3	SMC 控制系统的稳定性分析	57
5.5	基于 LESO 的准滑模快速机动控制	59

5.5.1	算法设计	60
5.5.2	稳定性分析	62
5.5.3	仿真与分析	63
5.6	基于终端滑模变结构的快速机动控制	68
5.6.1	小型卫星姿态数学模型	68
5.6.2	终端滑模控制方案设计	69
5.6.3	仿真研究	72
5.7	基于模型预测控制的卫星姿态控制	77
5.7.1	面向状态预估的控制模型建立	77
5.7.2	金字塔构型 CMG 群系统模型	79
5.7.3	卫星姿态机动路径的三段式规划	80
5.7.4	基于滚动时域优化的 CMG 群框架角速度跟踪律设计	84
5.7.5	仿真与分析	86
	参考文献	95

第 6 章 控制力矩陀螺操纵律设计

6.1	引言	96
6.2	SGCMG 的基本原理	96
6.3	SGCMG 的奇异原理	98
6.3.1	SGCMG 的奇异的定义	98
6.3.2	SGCMG 的角动量奇异面	99
6.3.3	SGCMG 的奇异面分类	100
6.4	几种典型的操纵律及分析	106
6.4.1	奇异回避操纵律	107
6.4.2	奇异逃离操纵律	108
6.4.3	混合操纵律	110
6.4.4	力矩输出能力最优原理	111
6.5	基于力矩输出能力最优的操纵律设计	112
6.5.1	最优框架角速度的求取	112
6.5.2	操纵律设计	113
6.5.3	框架锁定现象分析	114
6.5.4	力矩输出误差分析	115
6.6	仿真与分析	117
6.6.1	恒定力矩仿真	117

6.6.2	星体大角度机动仿真	124
6.7	基于高斯伪谱法的 SGCMG 最优轨迹规划	128
6.7.1	轨迹规划中的连续最优控制问题	128
6.7.2	高斯伪谱法基本原理	130
6.7.3	自适应高斯伪谱法基本原理	137
6.7.4	轨迹优化与分析	141
	参考文献	148
第7章	卫星姿态控制仿真技术	151
7.1	引言	151
7.2	全链路数学模型和 STK 显示成像系统设计与搭建	151
7.2.1	数学仿真参数设计	151
7.2.2	数学仿真系统框架设计	153
7.2.3	全链路成像 Simulink 模型建立	153
7.3	条带拼接成像姿态仿真与成像分析	156
7.3.1	Simulink 条带拼接成像仿真	158
7.3.2	STK 条带拼接成像仿真	163
7.4	自适应微光凝视成像姿态仿真与成像分析	165
7.4.1	Simulink 自适应微光成像仿真	165
7.4.2	STK 自适应微光成像仿真	168
7.5	钟摆式搜索成像姿态仿真与成像分析	169
7.5.1	Simulink 钟摆式搜索成像仿真	169
7.5.2	STK 钟摆式搜索成像仿真	171
7.6	地面转台实验技术	172
7.6.1	系统设计	172
7.6.2	卫星全物理仿真系统功能及工作模式	178
7.6.3	数学模型与全物理仿真实验	178
	参考文献	182

第1章 绪 论

随着航天技术的发展,对地观测卫星的分辨率被要求得越来越高。高精度的对地观测分辨率可以获得更多的目标信息,已成为当前对地观测卫星发展的主流趋势。然而,高精度的对地观测分辨率常意味着相对较小的视场孔径角,而若实现对敏感区域大范围的观测,就应使卫星能够快速频繁地姿态机动,这就要求卫星平台具备敏捷的姿态机动能力。敏捷的姿态机动能力可以保证卫星从一个目标区域观测完之后能够迅速机动到另一个目标区域,这样可以在一个轨道周期内采集到更多的科学数据,极大地增加整个卫星的功率密度。

小型卫星具有研制成本低、研制周期短、质量轻、体积小、响应快速等优点,已成为当今世界各国的研究热点。小型卫星主要指质量小于 1000kg 的近地轨道卫星,其研究设计依赖于微电子学、微型机械和微加工等现代航天技术的进步。小型卫星同样具有功能完整性,既可以实现传统大型卫星执行的各项航天任务,也可组成星座或编队飞行,利用编队飞行的灵活性和星座的重访周期短的优点,完成一些大型卫星难以胜任的任务^[1-3]。

机动及快速稳定能力是小型卫星广受重视的主要原因,尤其在卫星对地观测任务多种工作模式理念提出之后。姿态控制系统作为卫星的主要分系统之一,主要功能是实现卫星对地面目标的快速、精准、稳定指向。目前,我国遥感光学卫星通常采用星下点及侧摆的推扫成像模式,其要求卫星姿态控制系统具有一定的姿态机动性及较高的机动后姿态稳定性。现有技术主要是通过预留足够长的机动及稳定时间,以克服挠性附件或干扰力矩等造成的姿态波动。灵活多样的在轨成像模式,如多点目标成像、地面固定点凝视成像及非沿轨的灵巧成像等势必会提升遥感光学卫星的应用效能。但是,传统的卫星姿态控制技术难以满足多模式成像要求。新颖的成像模式需要卫星姿态控制系统在规定时间内完成卫星姿态的快速机动并保持较高精度的稳定性,或实现对期望姿态及姿态角速度的高精度跟踪控制,且对各种建模不确定性、刚柔耦合作用及外部干扰力矩等具有较强的鲁棒性,这对卫星姿态控制系统的设计提出了新的挑战。

1.1 敏捷型对地观测卫星发展现状

敏捷型卫星通常是指对姿态或轨道控制有快速机动要求的小型卫星,这一概念是航天任务多样化发展的必然产物,代表了对航天器姿态与轨道控制系统快速机动能力的更高要求。与传统航天器相比,敏捷型卫星的应用范围和效能显著提高,能够保障更长的载荷数据的传输时间,特别是在遥感信息获取、在轨服务非合作目标接近等任务背景下,可以实现以往常规技术难以企及的功能。在自然灾害频发、地区局势多变的今天,敏捷型卫星技术已经成为航天器研究领域中的焦点问题,掌握敏捷型卫星的控制技术将有利于及时准确地获得地面信息,为抗灾救灾、计划决策提供第一手资料,是提升国家实力的重要体现。

1.1.1 敏捷型卫星的成像模式

本节将对敏捷型卫星的成像模式进行归纳和总结,概括出 6 种经典成像模式,并深入研究每种成像模式的工作机理和实现策略。

1. 星下点成像模式

星下点成像是最传统的成像模式,也是最简单的成像模式,它只需卫星机动一个小姿态角且保持稳定状态,高分分辨率相机即可开机并沿飞行轨道对地球表面成像,推扫出一条与轨道走向一致的条带,如图 1-1 所示。

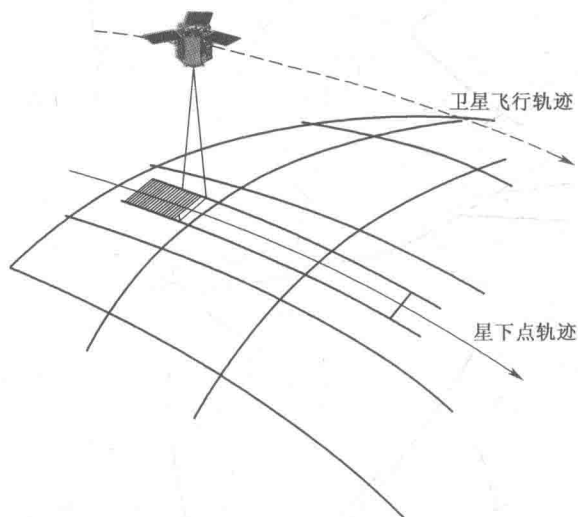


图 1-1 星下点成像模式

高分辨率相机在该过程中会受到地球自转以及相机本身视轴指向等因素的影响,目标点位置与星下点间有一些偏移,但是这种偏移非常微小,对卫星三轴姿态角的影响也比较小,这种模式称为星下点成像模式^[4,5]。卫星星下点成像模式不属于敏捷型成像模式,成像时卫星三轴对地稳定,卫星、地心连线与地球表面的交点(星下点)通常是观测点。

2. 大角度侧摆成像模式

国内外研制的高分辨率敏捷型卫星大部分已经具有大角度侧摆成像能力,如图 1-2 所示。大角度侧摆成像模式是指空间相机通过卫星侧摆姿态的机动对星下点投影两侧一定区域进行推扫成像。这种模式大大增加了空间相机单轨的可探测地面范围。但由于卫星的侧摆机动,卫星相机与目标点的距离相对拉长,空间相机在目标点的地面分辨率会相对变小^[6,7]。

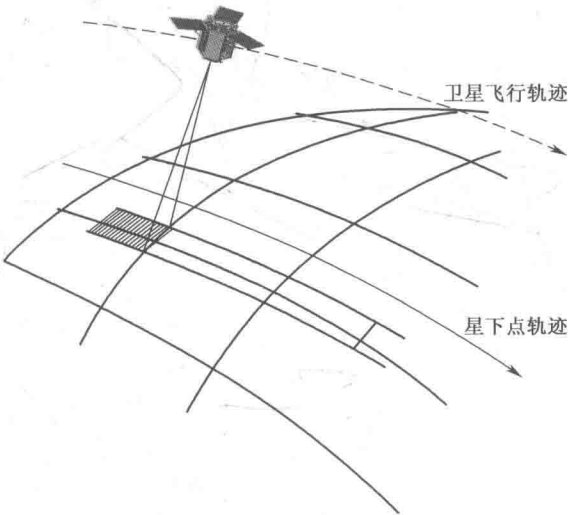


图 1-2 大角度侧摆成像模式

在相机拍摄期间,卫星对地姿态稳定。大角度侧摆成像模式相对于传统星下点成像模式对空间相机有更高的要求:①卫星的侧摆姿态精度和姿态稳定度;②对空间相机的像移补偿方面也提出了新的要求。这种模式属于最简单的敏捷成像模式^[8,9]。

3. 多轨连续条带成像模式

如图 1-3 所示,就单轨而言,卫星的多轨连续条带成像模式与大角度侧摆成像模式没有太大差别,差别在于不同轨间在地面上所成的多个条带是一个连续接壤的大区域,通过地面图像系统可以处理成一幅具有多个条带宽度的图像条带,实现一轨扩大卫星地面成像范围,增加地面覆盖单景成像宽度的目的^[10]。

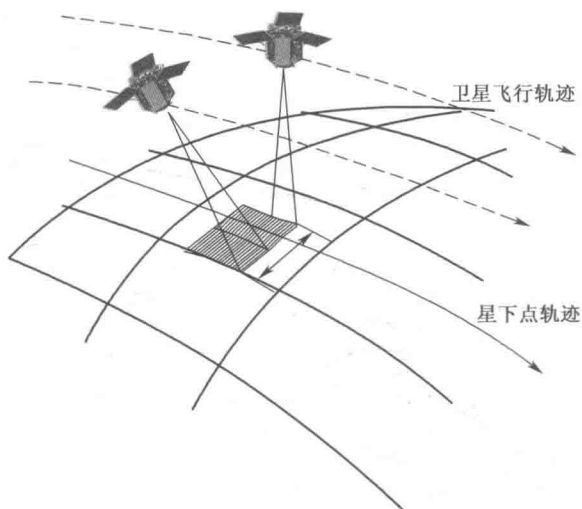


图 1-3 多轨连续条带成像模式

与单条带成像模式相比,多轨连续条带成像模式能够在更短的时间内实现对地球各个区域的完整覆盖。卫星的机动能力越大,可拼接条带数越多^[11]。但这种对区域目标进行分轨推扫的成像模式在实际应用时受到一定限制,因为空间相机尤其是高分辨率可见光相机,对光照条件有较高的要求,当太阳高度角过低或者夜间时无法进行对地成像^[12]。

4. 同轨连续条带成像模式

同轨连续条带成像模式如图 1-4 所示,同轨连续条带成像与多轨连续条带

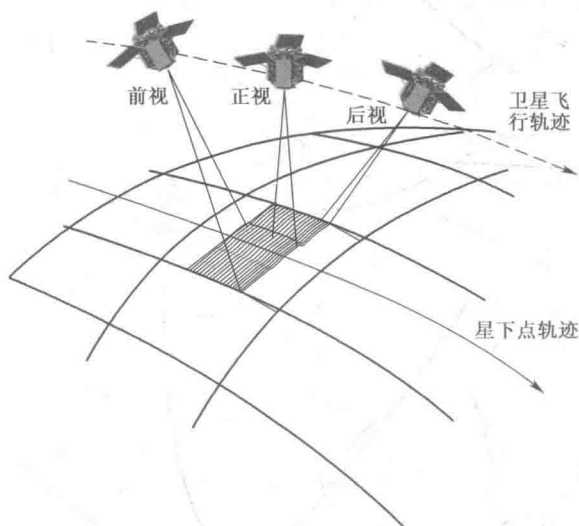


图 1-4 同轨连续条带成像模式

成像的目的是相同的,均是对地面某大区域目标划分成条带分别进行推扫成像,最后拼接成一幅数倍于单次推扫成像宽度的完整图像^[13]。与多轨连续条带成像模式不同的是,同轨连续条带成像模式是在一轨之内完成的,不仅需要卫星侧摆姿态相互配合,还必须与卫星俯仰轴、偏航轴的姿态快速机动互相匹配^[14]。

与多轨连续条带成像模式相比,同轨连续条带成像模式不会因为太阳光照条件的变化而漏掉一些条带(成像时间短),同时具有良好的实效性,但是该模式需要空间相机快速去适应更复杂的姿态变化,相机像移补偿的难度更大^[15]。

5. 同轨立体成像模式

如图 1-5 所示,同轨立体成像模式是指空间相机通过调整卫星俯仰姿态,在一轨中卫星以不同俯仰姿态对同一地面目标推扫成像,构成多个立体像对^[16]。

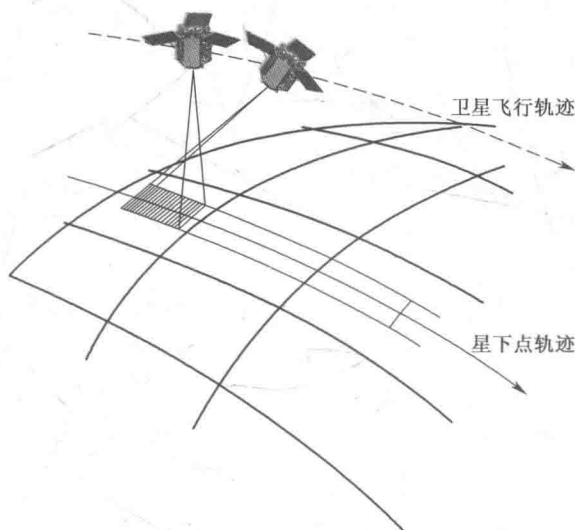


图 1-5 同轨立体成像模式

相比于多轨连续条带成像模式,同轨立体成像模式的成像实时性更强。但是多轨连续条带成像具有特殊的优势,如成像区域较大,灵活性较强,推扫的条带长度不受卫星姿态的限制。因此,通过多轨连续条带成像和同轨立体成像相结合,可以实现更大区域的立体成像和目标 360°全方位立体成像^[17]。

6. 同轨多目标成像模式

如图 1-6 所示,同轨多目标成像是指一轨内卫星通过多次快速完成侧摆和前后摆机动并且稳定以后对所能观测到的多个不同目标进行推扫成像;但每次推扫时间较短,相当于不同姿态下单条带推扫的集合^[18]。

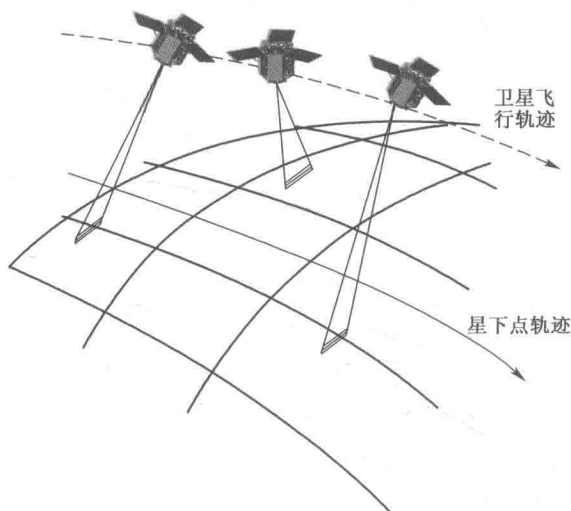


图 1-6 同轨多目标成像模式

一般情况下卫星不在姿态机动过程中对地成像。最大成像目标数受卫星的俯仰角范围和姿态机动能力的限制,卫星俯仰角范围越大,相机对地面可成像的时间越长,可成像目标数越大;卫星的姿态机动能力越强,两相邻成像目标点间的调整时间越短,可成像目标数越大^[19]。

1.1.2 典型的敏捷型卫星计划

敏捷卫星比传统的卫星具有很大的优势,拓宽了卫星的对地观测能力,实现了以前难以完成的卫星飞行任务。国内外敏捷卫星也正成为当前航天领域的一个研究热点,以美国、法国、意大利及印度为代表的研究机构提出了一系列敏捷型卫星相关计划,目前多已进入或即将进入实施阶段。

1. 昴宿星^[20-21]

昴宿星计划中的两颗卫星(图 1-7)均采用一体化结构框架设计,有效地降低了星体的转动惯量。此外,卫星姿态系统采用三轴稳定的控制方式。姿态测量单元有 3 个星敏感器和 4 个光纤陀螺,提供快速机动期间对姿态确定的要求。姿态机动执行机构采用卫星上安装的 4 个控制力矩陀螺,可以实现横滚轴和俯仰轴在 8s 内将卫星姿态调整 5° ,在 10s 内调整 10° ,在 25s 内调整 60° 。

2. WorldView 系列卫星^[22]

WorldView 系列卫星是美国数字地球公司所研制,用来取代 QuickBird 系列卫星成为新一代商业成像卫星系统。该系列所属的 WorldView-I 和 WorldView-II 卫星分别于 2007 年与 2009 年发射。这两颗卫星都采取了模块化的设计方