



# Distributed Space Missions for Earth System Monitoring

## 空间分布式对地观测系统

[意] 马尔科·德埃里克 (Marco D' Errico) 编著

刘付成 阳光 卢山 刘超镇 等译



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



Springer



# 空间分布式对地观测系统

Distributed Space Missions for Earth  
System Monitoring

[意] 马尔科·德埃里克 (Marco D'Errico) 编著  
刘付成 阳光 卢山 刘超镇 等译



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

空间分布式对地观测系统/(意)马尔科·德埃里克  
(Marco D'Errico)编著;刘付成等译. —北京:国防工  
业出版社,2018.4

书名原文: Distributed Space Missions for Earth System  
Monitoring

ISBN 978-7-118-10824-8

I. ①空… II. ①马… ②刘… III. ①卫星探测  
IV. ①P412.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 041564 号

*Distributed Space Missions for Earth System Monitoring*  
by Marco D'Errico

Copyright © 2013 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media  
All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行,版权所有,侵  
权必究。

※

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 36½ 字数 730 千字

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 188.00 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

# 《空间分布式对地观测系统》

## 翻译委员会

刘付成 阳 光 卢 山 刘超镇

张翰墨 刘宗明 曹姝清 徐 帷

武海雷 孙 玥 彭 杨 吴 蕊

## 译者序

分布式空间任务通过多个航天器协同工作进行对地观察和测量,在有效减少任务风险、降低系统成本方面可以发挥出重大作用,具有极其重要的工程实用价值和战略研究意义。

本书作为业界的权威参考书,重点对采用分布式航天器进行对地观测的任务进行了系统阐述,对空间分布式系统的有效载荷、控制系统、星间通信、地面基站等内容进行了详细介绍,并以典型分布式对地观测任务为实例进行了分析和说明。全书共分为4篇:第一篇介绍分布式系统的雷达载荷;第二篇全面讨论了天基分布式系统所涉及的相对动力学、制导、导航与控制等技术;第三篇重点论述了分布式对地观测任务中的技术难题,包括系统的自主性、导航能力及通信方法相互之间的制约关系;第四篇重点介绍了目前已上天验证和正在研制中的空间分布式对地观测系统。本书最后一章总结了分布式空间系统未来的发展趋势、潜力及风险。

本书是一本贴合工程应用,全面、细致论述分布式系统如何组成和如何在轨实现的著作。目前在航天领域,特别是航天器分布式系统工程研究领域,亟需一本可指导解决实际工程问题,涵盖分布式系统研制过程中自主性、可靠性、协作性等多方面设计因素的著作,这也是译者翻译该书的初衷。本书的翻译团队多年从事航天分布式系统的研究,具备丰富的工程技术经验,也确保了能更准确地理解、掌握、表达作者的研究成果。

在本书的翻译过程中,译者所工作的上海航天控制技术研究所、上海市空间智能控制技术重点实验室对翻译工作提供了大量的支持,同时本书的翻译也受到了国家重点研发计划项目(项目编号:2016YFB0501003)和上海市科技人才计划项目(项目编号:14XD1421400、14QB1401800)的资助,在此表示感谢。

限于译者的水平,翻译过程中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正,不吝赐教。

译者  
2018.1

## 前言

分布式航天器概念最初是在天文和行星际应用中引入的,但随后在地球观测中也提出了该方法。这种趋势掀起了在诸如动力学、通信、遥感和结构及其他领域的研究热潮。最早的研究和提出可追溯到20世纪80年代,随后在90年代公开发表了更进一步的系统研究,其主要表现在动力学方面,也就是在这10年中开展了关于分布式航天器更深入的研究,并取得了巨大成就。依靠于2颗合作卫星GRACE(旨在重力测定)、PRISMA(技术验证),一些任务得到了成功实现。Tandem-X(地球观测任务,载有合成孔径雷达干涉仪)代表了空间系统工程的巨大成就。它们将是未来增强型航天任务的雏形。

基于这些研究,人们公认未来的空间系统将利用协同平台来替代当前单片集成电路系统,并且完成其他不可能实现的任务(如那些要求大口径传感器的任务)。这些发展需要在不同层次的设计、实现和操作思想中具有革命性的变化。在有效载荷层面,必须评估将不同卫星上装载的不同载荷单元整合成一个任务有效载荷的能力。另外,新概念(如模块化、自主化、标准化以及即插即用元件)必须探究以获得有效的总线实现,新的分系统(如相对轨道设计、相对导航与控制、卫星互连)必须实行以获取新功能。

尽管分布式空间系统涉及多学科,但研究工作主要集中于特定的主题上。例如,如果一方面相对轨道动力学已经进行了深入研究,且在近10多年取得了较大进步,那么另一方面这些重点就会从载荷中单独考虑出来。另外,关于分布式传感器概念已经公开发表过很多结论,但鲜有考虑轨道动力学的相关问题。最后,多卫星系统背后的技术挑战(如测量、定位、通信)仅部分解决和利用。本书努力以截然不同的视角呈现出它的优美状态,并通过不同的试验验证各种表征分布式系统的核心问题,旨在更好地加强系统间的联系。

本书包括4篇共23章。第一篇主要分析了分布式合成孔径雷达,包括双基和多基雷达。第二篇研究了相对动力学和制导、导航与控制,该部分主要包括5章,描述了关于相对轨道的不同论题:设计;确定、维持与控制;测量。通过3种不同的导航方式解决了全球定位系统、无线电以及视觉测量的相关问题。第三篇讨论了分布式空间系统的技术挑战,其中分析了分布式方法对自主性、导航以及通信(空—空和空—地)的影响。第四篇介绍了近年来进行的一些任务和研究,分析了

分布式概念已经研究和应用到何种程度。这部分涵盖了雷达任务(如 Tandem - X)、重力测定任务(如 GRACE)和技术验证任务(如 PRISMA)。第 23 章为总结,对分布式空间任务方式的未来趋势、潜力和风险表明了作者的观点。

在 IAA 研究团队的策划下,本书由来自 7 个国家和众多机构(大学、研究中心、企业和机构)的 52 位作者合著。来自不同专业领域的众多作者对讨论的话题进行了广泛研究,并反映出不同的观点和可用方法。希望通过我们的努力,可以成功提供一个通用且可融会贯通的技术。

如此庞大团队的合作并不是件易事。衷心感谢所有作者为完成本书所付出的努力与贡献。非常感谢 Springer 全体职员,特别是 Maury Solomon 和 Megan Ernst,对我提出的各种问题、疑问及要求总能找到解决的办法。

最后,我要感谢 Antonio Moccia,在我完成硕士论文后,是他将我带进航天领域。他是走在教育和职业旅途中所有年轻人的榜样,为他们指明了清晰的方向。最后要特别感谢 Rainer Sandau,他介绍我进入 IAA 并融入国际环境中。没有他的帮助、建议和鼓励,我不能策划并合著完此书。

Marco D'Errico  
Aversa, 意大利

# 目录

## 第一篇 分布式雷达探测器

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第1章 双基合成孔径雷达 .....          | 001 |
| 1.1 绪论 .....                | 001 |
| 1.2 双基 SAR 几何构型 .....       | 004 |
| 1.3 系统性能 .....              | 008 |
| 1.3.1 几何分辨力 .....           | 009 |
| 1.3.2 辐射度分辨力和信噪比 .....      | 019 |
| 1.3.3 定时、定点和同步 .....        | 021 |
| 1.4 从猜想到概念验证 .....          | 023 |
| 1.4.1 双基雷达 .....            | 024 |
| 1.4.2 双基 SAR .....          | 025 |
| 1.4.3 已提出的星载任务 .....        | 029 |
| 1.5 双基 SAR 技术及应用 .....      | 030 |
| 1.5.1 来自单一接收平台的图像 .....     | 030 |
| 1.5.2 来自两个平台的图像 .....       | 033 |
| 参考文献 .....                  | 041 |
| 第2章 多基雷达系统 .....            | 048 |
| 2.1 绪论 .....                | 048 |
| 2.1.1 历史展望 .....            | 049 |
| 2.1.2 定义和基本原则 .....         | 049 |
| 2.2 应用实例 .....              | 051 |
| 2.2.1 垂迹干涉测量在地形测绘中的应用 ..... | 051 |
| 2.2.2 多基线垂迹干涉 .....         | 057 |
| 2.2.3 偏振 SAR 干涉测量 .....     | 057 |
| 2.2.4 SAR 层析成像 .....        | 058 |
| 2.2.5 稀疏层析成像 .....          | 060 |
| 2.2.6 沿迹干涉测量和动目标指示 .....    | 061 |



|       |               |     |
|-------|---------------|-----|
| 2.2.7 | 几何分辨力和辐射分辨力增强 | 061 |
| 2.2.8 | 非模糊宽测绘带成像     | 064 |
| 2.3   | 任务设计          | 065 |
| 2.3.1 | 编队选择          | 065 |
| 2.3.2 | 操作模式          | 072 |
| 2.3.3 | 雷达同步          | 074 |
| 2.3.4 | 基线测量和校准       | 080 |
| 2.4   | 研究例子          | 081 |
| 2.4.1 | TanDEM-L      | 081 |
| 2.4.2 | SIGNAL        | 085 |
| 2.4.3 | PICOSAR       | 087 |
| 2.5   | 结论            | 091 |
|       | 参考文献          | 092 |

## 第二篇 相对动力学和 GNC

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 第3章   | 相对轨道设计              | 100 |
| 3.1   | 绪论                  | 100 |
| 3.2   | 相对轨迹建模:小偏心率轨道       | 103 |
| 3.2.1 | 近距离编队               | 103 |
| 3.2.2 | 大编队                 | 110 |
| 3.3   | 相对轨迹建模:任意偏心率的椭圆轨道   | 111 |
| 3.4   | 相对轨迹设计              | 113 |
| 3.4.1 | SAR 干涉测量法           | 113 |
| 3.4.2 | SAR 成像              | 119 |
| 3.4.3 | 大基线 SAR             | 123 |
| 3.5   | 结论                  | 127 |
|       | 参考文献                | 128 |
| 第4章   | 编队构型建立、保持与控制        | 131 |
| 4.1   | 绪论                  | 131 |
| 4.2   | 圆轨道编队几何构型           | 131 |
| 4.3   | 基于 CW 方程的脉冲控制编队构型建立 | 133 |
| 4.3.1 | 平面椭圆编队初始化           | 133 |
| 4.4   | 基于微分轨道要素的编队描述       | 135 |
| 4.5   | 考虑 $J_2$ 摄动影响的编队初始化 | 136 |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 4.6        | 编队构型保持的连续控制 .....           | 138        |
| 4.6.1      | 燃料最小化及平衡 .....              | 139        |
| 4.6.2      | 控制律设计 .....                 | 140        |
| 4.7        | 考虑 $J_2$ 影响的高斯变分方程 .....    | 141        |
| 4.7.1      | 圆轨道编队构型控制的高斯方程 .....        | 142        |
| 4.8        | Gim - Alfriend 状态转换矩阵 ..... | 143        |
| 4.9        | 燃料最优控制 .....                | 144        |
| 4.9.1      | 编队构型建立和重构 .....             | 144        |
| 4.9.2      | 编队构型保持 .....                | 146        |
| 4.10       | 结论 .....                    | 147        |
|            | 参考文献 .....                  | 148        |
| <b>第5章</b> | <b>基于GPS的相对导航 .....</b>     | <b>150</b> |
| 5.1        | 绪论 .....                    | 150        |
| 5.2        | 星载GPS接收机 .....              | 151        |
| 5.2.1      | 星载GPS技术 .....               | 151        |
| 5.2.2      | 接收机 .....                   | 154        |
| 5.3        | GPS轨道确定方法 .....             | 156        |
| 5.3.1      | 观测类型与测量模型 .....             | 157        |
| 5.3.2      | 动力学模型 .....                 | 159        |
| 5.3.3      | 数值积分 .....                  | 161        |
| 5.3.4      | 估算 .....                    | 162        |
| 5.4        | 任务结果 .....                  | 165        |
| 5.4.1      | 相对运动任务 .....                | 165        |
| 5.4.2      | 精确基线确定 .....                | 166        |
| 5.4.3      | 实时导航 .....                  | 170        |
| 5.5        | 结论 .....                    | 174        |
|            | 参考文献 .....                  | 175        |
| <b>第6章</b> | <b>基于无线电频率的相对导航 .....</b>   | <b>183</b> |
| 6.1        | 前言 .....                    | 185        |
| 6.1.1      | 必要性 .....                   | 186        |
| 6.1.2      | 基本准则 .....                  | 186        |
| 6.1.3      | 本章结构 .....                  | 186        |
| 6.2        | 相对导航 .....                  | 187        |
| 6.2.1      | 观测模型 .....                  | 187        |

|            |                  |            |
|------------|------------------|------------|
| 6.2.2      | 相对状态估计           | 191        |
| 6.3        | 系统设计考虑的因素        | 197        |
| 6.3.1      | 信号设计考虑因素         | 197        |
| 6.3.2      | 硬件设计考虑因素         | 202        |
| 6.4        | 系统范例和性能          | 207        |
| 6.4.1      | 没有飞行继承性的系统       | 207        |
| 6.4.2      | 具备飞行经验的系统        | 208        |
| 6.4.3      | 测试和验证            | 210        |
| 6.4.4      | 获得的性能            | 211        |
| 6.5        | 总结和结论            | 212        |
| 6.5.1      | 总结               | 212        |
| 6.6        | 小结               | 213        |
| 6.6.1      | 未来趋势             | 214        |
|            | 参考文献             | 214        |
| <b>第7章</b> | <b>基于视觉的相对导航</b> | <b>217</b> |
| 7.1        | 绪论               | 217        |
| 7.2        | 任务、传感器和技术        | 218        |
| 7.2.1      | 微纳卫星技术发展项目       | 220        |
| 7.2.2      | 工程试验卫星           | 221        |
| 7.2.3      | 轨道快车             | 223        |
| 7.2.4      | PRISMA 计划        | 226        |
| 7.3        | 图像处理算法和技术        | 227        |
| 7.3.1      | 假设               | 228        |
| 7.3.2      | 图像处理算法的通用形式      | 229        |
| 7.3.3      | 二值化              | 230        |
| 7.3.4      | 标记               | 231        |
| 7.3.5      | 边缘检测             | 232        |
| 7.3.6      | 基于模式匹配的相关性处理     | 234        |
| 7.3.7      | 计算资源记录           | 235        |
| 7.4        | 姿态确定技术与算法        | 235        |
| 7.4.1      | 单目技术             | 237        |
| 7.4.2      | 三维空间技术           | 241        |
| 7.4.3      | 动力学滤波技术          | 242        |
| 7.5        | 总结和未来发展趋势        | 244        |
|            | 参考文献             | 244        |

## 第三篇 技术挑战

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第8章 自主性 .....                         | 249 |
| 8.1 绪论 .....                          | 249 |
| 8.1.1 纳卫星 .....                       | 250 |
| 8.1.2 自主性 .....                       | 250 |
| 8.2 空间任务的自主性 .....                    | 251 |
| 8.2.1 自主性概念 .....                     | 251 |
| 8.3 任务自主规划与调度 .....                   | 253 |
| 8.3.1 单平台 .....                       | 253 |
| 8.3.2 多平台系统 .....                     | 255 |
| 8.4 分布式系统技术:多智能体系统 .....              | 256 |
| 8.4.1 自组织和涌现 .....                    | 257 |
| 8.4.2 协同机制 .....                      | 258 |
| 8.4.3 技术挑战 .....                      | 260 |
| 8.5 结论 .....                          | 261 |
| 参考文献 .....                            | 262 |
| 第9章 相对导航 .....                        | 267 |
| 9.1 绪论 .....                          | 267 |
| 9.2 相对导航传感器 .....                     | 268 |
| 9.2.1 GNSS 技术 .....                   | 269 |
| 9.2.2 射频技术 .....                      | 269 |
| 9.2.3 光学导航传感器 .....                   | 269 |
| 9.3 相对导航精度要求 .....                    | 269 |
| 9.3.1 高精度相对定位任务 .....                 | 270 |
| 9.3.2 中等位置精度任务 .....                  | 270 |
| 9.4 相对姿态控制要求 .....                    | 270 |
| 9.4.1 多卫星相对姿态控制 .....                 | 271 |
| 9.4.2 在轨监视相对姿态控制 .....                | 271 |
| 9.4.3 姿态控制对相对轨道确定的影响 .....            | 271 |
| 9.5 软件挑战 .....                        | 272 |
| 9.5.1 基于光学成像的相对姿态估计 .....             | 272 |
| 9.5.2 基于 GPS 或者 RF 传感器的相对轨道确定算法 ..... | 272 |
| 9.5.3 自主相对导航 .....                    | 273 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 9.6 硬件限制 .....                    | 274        |
| 9.6.1 GPS 接收机选择 .....             | 274        |
| 9.6.2 处理能力选择 .....                | 274        |
| 9.6.3 新型的推进技术 .....               | 275        |
| 9.6.4 纳卫星局限性 .....                | 275        |
| 9.7 结论 .....                      | 275        |
| 参考文献 .....                        | 275        |
| <b>第 10 章 分布式卫星通信系统 .....</b>     | <b>278</b> |
| 10.1 绪论 .....                     | 278        |
| 10.2 典型场景要求 .....                 | 278        |
| 10.3 分布式系统通信概念 .....              | 279        |
| 10.3.1 集中/分散网络结构 .....            | 279        |
| 10.3.2 互联网协议 (IP) .....           | 280        |
| 10.3.3 移动 ad-hoc 网络 (MANet) ..... | 281        |
| 10.3.4 可延迟网络 .....                | 283        |
| 10.3.5 基于网络的分布式卫星控制 .....         | 283        |
| 10.4 结论和未来趋势 .....                | 284        |
| 参考文献 .....                        | 284        |
| <b>第 11 章 分布式卫星地面站网络系统 .....</b>  | <b>286</b> |
| 11.1 绪论 .....                     | 286        |
| 11.1.1 传统地面站 .....                | 287        |
| 11.1.2 低成本接收站 .....               | 288        |
| 11.1.3 技术挑战 .....                 | 290        |
| 11.2 地面站网络 .....                  | 292        |
| 11.2.1 基础设施 .....                 | 292        |
| 11.2.2 高度分布式地面站网络 .....           | 293        |
| 11.2.3 规划与调度 .....                | 295        |
| 11.2.4 地面站网络的协调和管理 .....          | 296        |
| 11.3 未来发展 .....                   | 297        |
| 参考文献 .....                        | 298        |

## 第四篇 科研与任务

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>第 12 章 分布式任务综述 .....</b> | <b>300</b> |
| 12.1 绪论 .....               | 300        |

|               |                              |            |
|---------------|------------------------------|------------|
| 12.2          | TOPSAT .....                 | 301        |
| 12.3          | Techsat -21 .....            | 302        |
| 12.4          | A - Train 和 Morning 星座 ..... | 302        |
| 12.5          | F6 .....                     | 305        |
| 12.6          | 分布式光学载荷 .....                | 306        |
| 12.7          | 技术展示任务 .....                 | 307        |
|               | 参考文献 .....                   | 308        |
| <b>第 13 章</b> | <b>TanDEM - X .....</b>      | <b>311</b> |
| 13.1          | 绪论 .....                     | 311        |
| 13.2          | 任务概念 .....                   | 313        |
| 13.2.1        | 螺旋卫星编队 .....                 | 313        |
| 13.2.2        | 干涉测量模式 .....                 | 314        |
| 13.2.3        | 禁区 .....                     | 314        |
| 13.2.4        | 雷达同步 .....                   | 315        |
| 13.2.5        | 干涉测量性能和数据采集规划 .....          | 316        |
| 13.3          | 空间段 .....                    | 317        |
| 13.4          | 地面段结构 .....                  | 319        |
| 13.5          | 全球 DEM 采集计划 .....            | 321        |
| 13.5.1        | DEM 采集计划简介 .....             | 321        |
| 13.5.2        | 关键规划参数——模糊高度 .....           | 322        |
| 13.5.3        | 采集规划 .....                   | 323        |
| 13.6          | 编队控制 .....                   | 325        |
| 13.6.1        | 轨道控制概念 .....                 | 325        |
| 13.6.2        | 编队控制性能 .....                 | 327        |
| 13.7          | 精确基线估计 .....                 | 327        |
| 13.7.1        | 精确相对 3D 导航的 DGPS 方法 .....    | 327        |
| 13.7.2        | 基线组合 .....                   | 327        |
| 13.8          | 数据处理 .....                   | 329        |
| 13.8.1        | 处理过程面临的问题 .....              | 330        |
| 13.8.2        | DEM 生成准则 .....               | 331        |
| 13.8.3        | SAR 图像配准 .....               | 331        |
| 13.8.4        | 双基 SAR 处理 .....              | 331        |
| 13.8.5        | 相位解缠 .....                   | 332        |
| 13.8.6        | 绝对相位偏移的确定 .....              | 333        |
| 13.8.7        | 质量控制 .....                   | 333        |

|               |                            |            |
|---------------|----------------------------|------------|
| 13.8.8        | 多基线相位解缠 .....              | 334        |
| 13.9          | 干涉测量和 DEM 性能监视 .....       | 335        |
| 13.10         | 双基和干涉测量系统校准 .....          | 338        |
| 13.10.1       | 期望高度误差 .....               | 338        |
| 13.10.2       | 基线校准 .....                 | 339        |
| 13.10.3       | 设备校准以及外部迟滞 .....           | 339        |
| 13.10.4       | 运行期间的 DEM 稳定性 .....        | 340        |
| 13.11         | DEM 校准和图像镶嵌 .....          | 341        |
| 13.11.1       | DEM 校准方法 .....             | 341        |
| 13.11.2       | 图像镶嵌—DEM 加权组合 .....        | 343        |
| 13.12         | 科学利用和试验结果 .....            | 344        |
| 13.12.1       | 空间对地速度测量 .....             | 344        |
| 13.12.2       | 大基线垂迹干涉测量 .....            | 346        |
| 13.12.3       | 偏振 SAR 干涉测量 .....          | 347        |
| 13.13         | 结论 .....                   | 348        |
|               | 参考文献 .....                 | 349        |
| <b>第 14 章</b> | <b>干涉“车轮”计划 .....</b>      | <b>354</b> |
| 14.1          | 基本原理 .....                 | 354        |
| 14.2          | 轨道构型 .....                 | 355        |
| 14.3          | 特殊性处理 .....                | 357        |
| 14.4          | 产品 .....                   | 358        |
| 14.5          | 先进应用 .....                 | 360        |
|               | 参考文献 .....                 | 361        |
| <b>第 15 章</b> | <b>SABRINA 任务 .....</b>    | <b>363</b> |
| 15.1          | 绪论 .....                   | 363        |
| 15.2          | 大基线双基应用和技术 .....           | 364        |
| 15.2.1        | 基于 LBB 雷达信号的雷达测量 .....     | 365        |
| 15.2.2        | 基于多普勒分析的速度测量 .....         | 366        |
| 15.2.3        | 海波谱的高分辨测量 .....            | 367        |
| 15.2.4        | LBB 雷达信号的 RCS 研究 .....     | 367        |
| 15.2.5        | 基于 LBB SAR 原始数据的姿态确定 ..... | 368        |
| 15.2.6        | 分类和模式识别过程改进 .....          | 368        |
| 15.3          | 干涉测量与偏振测量的应用 .....         | 368        |
| 15.3.1        | 沿迹双基测量 .....               | 369        |

|        |                                         |     |
|--------|-----------------------------------------|-----|
| 15.3.2 | 垂迹双基 SAR 测量 .....                       | 370 |
| 15.4   | 任务分析 .....                              | 371 |
| 15.4.1 | 小基线阶段 .....                             | 371 |
| 15.4.2 | 大基线阶段 .....                             | 374 |
| 15.5   | 相对距离与安全性 .....                          | 379 |
| 15.6   | 结论 .....                                | 381 |
|        | 参考文献 .....                              | 381 |
| 第 16 章 | TOPOLEV 和 C - PARAS .....               | 384 |
| 16.1   | 欧空局 EO 小型任务综述 .....                     | 384 |
| 16.2   | TOPOLEV 任务 .....                        | 386 |
| 16.2.1 | 介绍 .....                                | 386 |
| 16.2.2 | 需求分析 .....                              | 387 |
| 16.2.3 | 任务和系统分析 .....                           | 389 |
| 16.2.4 | 有效载荷及其性能分析 .....                        | 392 |
| 16.2.5 | 任务特征 .....                              | 397 |
| 16.2.6 | 关键技术 .....                              | 397 |
| 16.2.7 | 总结与开发 .....                             | 398 |
| 16.3   | C - PARAS 任务 .....                      | 400 |
| 16.3.1 | 介绍 .....                                | 400 |
| 16.3.2 | 需求分析 .....                              | 401 |
| 16.3.3 | 任务和系统分析 .....                           | 403 |
| 16.3.4 | 有效载荷及其性能分析 .....                        | 405 |
| 16.3.5 | 任务性能 .....                              | 409 |
| 16.3.6 | 关键技术 .....                              | 410 |
| 16.3.7 | 总结与应用 .....                             | 410 |
| 16.4   | 鸣谢 .....                                | 411 |
|        | 附录 .....                                | 412 |
|        | 参考文献 .....                              | 413 |
| 第 17 章 | SAR 列车 .....                            | 414 |
| 17.1   | 绪论 .....                                | 414 |
| 17.2   | $N$ 个单基 SAR 组成的纵队 .....                 | 415 |
| 17.2.1 | 基本优势: 能量加法 .....                        | 415 |
| 17.2.2 | $N$ 元天线阵列的建模 .....                      | 415 |
| 17.2.3 | 随机 SAR 距离与降低模糊性: SAR 列车信号清洗模式 .....     | 416 |
| 17.2.4 | 卫星的精确时间空间距离(以 $V/PRF$ 为模): SAR 列车 ..... |     |



|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 天线面积稀释(AD)和品质因数倍增模式 .....          | 416 |
| 17.2.5 扩频波形 .....                  | 418 |
| 17.3 对编队构型的认识及控制 .....             | 420 |
| 17.3.1 SAR 列车轨道实施实例 .....          | 420 |
| 17.3.2 连续信号增加的基本条件 .....           | 420 |
| 17.3.3 降低模糊性的条件(标准脉冲波形) .....      | 421 |
| 17.3.4 改善品质因数与天线稀释的条件(标准波形) .....  | 421 |
| 17.3.5 扩频波形的运用 .....               | 423 |
| 17.4 可视情况下 $N$ 个 SAR 列车 .....      | 423 |
| 17.4.1 SAR 列车实施的实例 .....           | 423 |
| 17.4.2 单一传输的 SAR 列车:T/R 对等列车 ..... | 424 |
| 17.4.3 可视情况下 SAR 列车的若干次信号发射 .....  | 425 |
| 17.4.4 一个特殊的实施案例:地面运动目标识别 .....    | 425 |
| 17.5 结论与今后研究工作 .....               | 425 |
| 附录 扩频 SAR .....                    | 426 |
| 参考文献 .....                         | 427 |
| <br>第 18 章 P 波段分布式 SAR .....       | 428 |
| 18.1 绪论 .....                      | 428 |
| 18.2 科学应用 .....                    | 429 |
| 18.2.1 森林区域分类和生态估计 .....           | 429 |
| 18.2.2 冰层探测和地表下分析 .....            | 430 |
| 18.3 概念发展 .....                    | 430 |
| 18.3.1 分布式载荷概念 .....               | 430 |
| 18.3.2 初步性能分析 .....                | 432 |
| 18.4 任务分析、航天器设计以及编队控制 .....        | 435 |
| 18.4.1 任务分析 .....                  | 435 |
| 18.4.2 航天器初步设计 .....               | 437 |
| 18.4.3 编队控制 .....                  | 440 |
| 18.5 展望和结论 .....                   | 441 |
| 参考文献 .....                         | 441 |
| <br>第 19 章 重力恢复与气候试验 .....         | 444 |
| 19.1 任务回顾 .....                    | 444 |
| 19.2 科学 .....                      | 445 |
| 19.2.1 重力地图的绘制 .....               | 445 |