

卫星导航定位技术系列丛书

星载GNSS 卫星编队相对导航技术

SPACEBORNE GNSS RELATIVE NAVIGATION TECHNOLOGY FOR SATELLITES FORMATION

主 编 陈明剑
副主编 李俊毅 田建波 李万里
陈 刚 王志民



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCE PRESS

卫星导航定位技术系列丛书

星载 GNSS 卫星编队相对导航技术

SPACEBORNE GNSS RELATIVE NAVIGATION TECHNOLOGY
FOR SATELLITES FORMATION

主 编 陈明剑

副主编 李俊毅 田建波 李万里

陈 刚 王志民



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

内容简介

本书是关于编队卫星动态相对导航理论与方法的一本专著。全书立足于编队卫星分析,利用 GNSS 动对动理论,阐述编队卫星状态估计的研究成果。全书主要围绕编队卫星动力学和运动学建模、卫星导航系统计算机仿真设计、基于 GNSS 卫星相对导航建模、解算及误差分析进行了探讨和研究。

本书可供从事卫星导航、卫星编队、编队卫星相对导航的工程技术人员和高校相关专业教师及研究生阅读,也可作为专业教学参考书,具有很好的参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

星载 GNSS 卫星编队相对导航技术/陈明剑主编;李俊毅,田建波,李万里,陈刚,王志民副主编. —武汉:中国地质大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5625-3696-3

I. ①星…

II. ①陈…②李…③田…④李…⑤陈…⑥王…

III. ①卫星-导航

IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 190879 号

星载 GNSS 卫星编队相对导航技术

陈明剑 主 编
李俊毅 田建波 李万里 陈 刚 王志民 副主编

责任编辑:胡 珞 兰

选题策划:蓝 翔

责任校对:周 旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:360 千字 印张:14

版次:2016 年 1 月第 1 版

印次:2016 年 1 月第 1 次印刷

印刷:武汉市教文印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3696-3

定价:58.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

近几年在发展的众多卫星空间技术中,结构简单的卫星编队空间探测因其灵活、高效以及低成本已成为空间测量及探索重点关注和研究的热门技术。从国际上发展编队飞行技术及相关领域发展规划来看,编队飞行已成为美国及其他空间大国未来 20 年航天活动重点发展的领域,也是他们中长期规划中的重点之一。这一技术,集中了目前为止航天技术中所取得的几乎所有的先进技术。而为了能够更加准确实时地确定编队卫星之间的卫星状态,进行卫星自主导航和编队卫星自主控制,星载 GNSS(全球卫星导航系统)随着现代卫星导航定位系统的发展将成为编队卫星技术中重点研究的传感器之一。

GNSS 以其高精度、全天候、全球覆盖和广泛的应用前景吸引了全世界的关注,成为代替传统导航、定位和测时的重要手段。很多研究表明,GNSS 是精确相对导航和姿态确定的传感器之一,尤其是 GNSS 载波相位差分测量在飞行器之间能够达到厘米级的相对导航定位精度,表明 GNSS 测量具有良好的精确性和鲁棒性。

2015 年 3 月 20 日 21 时 52 分,我国第 17 颗北斗导航卫星在西昌发射成功。标志着我国北斗卫星导航系统由区域运行向全球运行拓展,开始全球组网。我国北斗卫星导航系统与 GPS 系统、GLONASS 系统、GALILEO 系统并称四大全球卫星导航系统。而基于我国北斗以及其他卫星导航系统进行航天器编队飞行,目前仍然是空白,而且在未来的几年中,将会随着我国北斗卫星导航系统的推广,受到国际上的广泛关注。

本书是在国内外的研究基础上,立足本国的现状,着眼于我国卫星导航系统及其他卫星导航定位系统的应用,利用码伪距观测量和载波相位观测量,实现编队卫星高精度自主运行相对导航。主要内容来自实践教学部分内容以及三位博士的学位论文,即陈明剑的《基于星载 GNSS 编队飞行相关技术的研究》、李俊毅的《GNSS 动态相对定位算法研究》和李万里的《惯性/多普勒组合导航回溯算法研究》。由于都涉及到卫星导航相对导航定位相关问题,因此,作者针对导航学科课程教学没有合适的编队飞行导航教材,萌生成书的想法,希望在编队卫星领域进行一些探讨和研究。

本书主要内容如下:

第 1 章论述卫星编队飞行技术的概念,以及相对导航定位的意义,阐述现在

导航定位系统的发展现状及应用星载 GNSS(全球卫星导航系统)进行导航定位意义,阐述目前的研究现状以及存在的不足,并论述本书的研究目的及主要研究内容。

第2章首先较全面地介绍了星载 GNSS 相对导航所用到的时空系统。推导了编队卫星飞行相对导航的运动方程,分析特殊编队卫星的飞行条件,从动力学和运动学角度分别研究了编队轨道的运动特征、表达方式。在此基础上,介绍了编队飞行卫星的主要摄动力及其对轨道的影响。

第3章论述相对导航观测基本观测量,列举了 GNSS 基本观测量及差分观测量,并给出了相应的观测方程;分析星载 GNSS 编队飞行动态相对定位中的主要误差源,分别对卫星星历误差、电离层折射延迟、多路径效应误差、观测噪声的成因进行了讨论。

第4章主要介绍相对导航状态估计需要应用的滤波算法,针对几种经典的非线性滤波算法进行了介绍,包含扩展卡尔曼滤波、UKF 滤波及自适应 UKF 滤波算法。最后对粒子滤波算法也进行了一定的阐述和分析,以期能够应用于工程实践。

第5章针对目前的基本星载 GNSS 编队相对导航数据问题,介绍了对现代卫星导航系统的观测信号进行仿真。给出仿真的基本设计流程,分析并给出了卫星钟差、卫星设备时延差 TGD、电离层延迟、对流层延迟、接收机感测噪声、多路径效应,地球自转改正、天线相位中心偏差等模型,从而对观测信号进行了仿真的工程实现。结合仿真,针对 GNSS 导航定位应用的空间,分别分析载体在地面服务空域、空间服务的可见性问题,推导出了载体在掩星及是否位于主瓣或旁瓣信号中等条件下的可见性公式。

第6章主要针对现代化卫星导航定位系统多频数据特点,结合分析北斗卫星导航系统(BDS)数据质量问题,给出基于 BDS 观测的线性组合,发现有利于周跳探测与修复的组合形式,为后续的导航定位解算进行数据预处理。针对星载 GNSS 观测数据过大、减轻星上数据链的压力以及减少在轨星上存储的大小问题,研究星载存储数据压缩技术。

第7章利用相对导航间接方法,即星载 GNSS 绝对定位方法实现相对导航。采用多频码相结合单点定位有利于工程实现,便于星上计算机计算,提出了在多频码相结合单点定位基础上,进行基于渐消因子扩展卡尔曼滤波和基于残差分析的抗差自适应卡尔曼滤波算法。

第8章对于直接方法的相对导航定位解算而言,基于多频数据,分析动态情况下,提出改善方程的病态性的方法,并应用于模糊度解算。

本书研究内容是在国际广泛关注卫星编队相对导航技术大的环境下进行的,具有一定的先进性;着眼于我国北斗卫星导航系统的应用与空间航天器编队飞行

相对导航相关技术及算法的研究。其中所做的研究和工作,也与我国有关卫星的研究内容的关键技术相一致。本书对从事卫星导航、卫星编队、编队卫星相对导航的工程技术人员和高校相关专业教师及研究生具有很好的参考作用。

在编写本书的过程中,作者参阅和部分引用了一些专家学者的论文和专著,在此对原作者表示衷心感谢。全书第1章由陈明剑、李俊毅撰写;第2章由陈刚撰写;第3章由田建波撰写;第4章由李万里、王志民撰写,第5章由陈明剑、李俊毅撰写;第6、7章由陈明剑撰写;第8章由李俊毅撰写。全书由陈明剑、李俊毅统稿。尹子明、汪威、闫建巧、周润扬、刘天恒、张树为等参加了校对与资料搜集,在此一并表示感谢!作者在撰写过程中得到了多方面的支持,衷心感谢信息工程大学导航与空天目标工程学院的领导和同事们的关心。感谢国内外同行的研究成果。由于作者水平有限,书中错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2015年2月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 卫星编队概念	(1)
1.2 卫星编队的特点	(5)
1.3 卫星编队的发展趋势	(6)
1.3.1 加强与扩大卫星编队飞行的应用领域	(6)
1.3.2 加强小卫星编队飞行各组成子系统及相关技术的研究	(6)
1.3.3 编队卫星标准化研究	(7)
1.4 星载 GNSS 编队飞行的意义	(7)
1.4.1 星载 GNSS 相对导航的意义	(8)
1.4.2 卫星导航系统发展概述	(9)
1.5 相关研究进展	(12)
2 编队卫星运动学和动力学基础	(15)
2.1 编队飞行所用坐标系	(15)
2.1.1 地心惯性坐标系	(16)
2.1.2 地心地固坐标系	(16)
2.1.3 相对运动参考坐标系	(17)
2.1.4 轨道坐标系	(17)
2.1.5 本体坐标系	(17)
2.2 时间系统	(18)
2.2.1 时间基准	(18)
2.2.2 历法	(22)
2.2.3 时间系统间的转换关系	(23)
2.3 基于动力学的编队飞行分析	(26)
2.3.1 编队飞行动力学方程	(27)
2.3.2 编队飞行动力学相对运动方程的解析解	(30)
2.3.3 编队飞行相对运动特性	(31)
2.4 基于运动学的编队飞行分析	(35)
2.4.1 编队飞行运动学方程	(35)
2.4.2 编队飞行运动学相对运动方程的解析解	(36)
2.4.3 动力学与运动学方法比较	(38)
2.5 编队卫星的受摄运动分析	(39)

2.5.1	近地轨道的受摄运动	(40)
2.5.2	J_2 摄动作用下编队构型的表达	(44)
2.5.3	大气摄动作用下编队构型的稳定性	(49)
3	GNSS 相对导航定位原理	(53)
3.1	观测方程	(53)
3.1.1	GNSS 测量的基本观测量	(53)
3.1.2	测码伪距测量	(54)
3.1.3	测相伪距测量	(56)
3.2	精密相对导航定位数学模型	(60)
3.2.1	有几何观测模型	(60)
3.2.2	无几何观测模型	(62)
3.2.3	时间平均模型	(63)
3.2.4	有几何模型和无几何模型的比较	(64)
3.2.5	随机模型	(64)
3.3	误差分析	(66)
3.3.1	卫星轨道误差	(66)
3.3.2	卫星钟差误差	(67)
3.3.3	卫星天线相位中心改正	(68)
3.3.4	电离层延迟	(68)
3.3.5	对流层延迟	(70)
3.3.6	接收机天线相位中心改正	(70)
3.3.7	相对论效应	(71)
3.3.8	多路径效应	(72)
4	卫星编队状态估计与分析	(73)
4.1	常规卡尔曼滤波算法	(73)
4.1.1	线性系统卡尔曼滤波	(73)
4.1.2	自适应卡尔曼滤波	(77)
4.1.3	扩展卡尔曼滤波	(80)
4.2	UKF 滤波	(80)
4.2.1	UT 变换	(81)
4.2.2	UKF 滤波算法	(82)
4.2.3	自适应 UKF 滤波	(83)
4.3	粒子滤波理论	(84)
4.3.1	贝叶斯滤波	(85)
4.3.2	粒子滤波算法实现	(86)
5	卫星编队仿真设计	(94)
5.1	GNSS 仿真功能	(95)

5.2	数据仿真	(96)
5.2.1	导航星座仿真	(97)
5.2.2	卫星钟差与接收机钟差仿真	(102)
5.2.3	星上设备时延差 TGD 仿真	(104)
5.2.4	电离层延迟仿真模型	(105)
5.2.5	对流层延迟仿真	(108)
5.2.6	接收机观测噪声与多路径效应仿真模型	(112)
5.2.7	地球自转改正	(113)
5.2.8	相对论效应改正	(113)
5.2.9	用户轨迹仿真模型	(113)
5.2.10	RNSS 观测数据仿真模型	(113)
5.3	观测数据仿真应用及验证	(114)
5.3.1	静态数据验证	(119)
5.3.2	动态数据验证	(120)
5.4	卫星编队飞行可视化三维仿真设计	(120)
5.4.1	动力学仿真模块	(122)
5.4.2	无摄条件下三维场景仿真	(124)
5.4.3	有摄相对运动动力学仿真	(130)
5.4.4	数据存储与查询模块	(136)
5.5	基于编队卫星 GNSS 可见性的研究	(139)
5.5.1	GNSS 服务空域	(139)
5.5.2	卫星仰角大于零时空载体可见性分析	(140)
5.5.3	卫星仰角小于零时空载体可见性分析	(141)
5.5.4	仿真结果与分析	(142)
6	GNSS 观测值数据预处理	(144)
6.1	GNSS 观测数据质量分析	(144)
6.1.1	多项式拟合与观测数据相减	(144)
6.1.2	同一频率不同类型观测量相减	(146)
6.1.3	卫星载噪比分析	(147)
6.2	常用周跳探测与修复方法	(148)
6.2.1	伪距相位组合法	(149)
6.2.2	多项式拟合法	(149)
6.2.3	电离层残差法	(151)
6.3	基于多频观测数据线性组合	(153)
6.3.1	研究多频数据组合的原因	(153)
6.3.2	组合观测值的定义	(153)
6.3.3	组合观测值性质分析	(155)
6.4	消除电离层二阶项影响的组合特性	(156)

6.5	BDS 探测周跳的组合	(158)
6.5.1	失锁时间较短的周跳探测和修复	(159)
6.5.2	失锁时间较长的周跳探测和修复	(160)
7	星载 GNSS 卫星编队绝对定位	(161)
7.1	利用多频载波相位组合进行单点定位	(161)
7.1.1	码相组合确定整周模糊度	(161)
7.1.2	多频载波单点定位基本模型	(162)
7.1.3	不同载波相位组合单点定位结果及比较	(163)
7.1.4	多频载波相位组合单点定位比较	(164)
7.2	多频码相位单点定位中渐消因子扩展卡尔曼滤波	(166)
7.3	多频码相组合单点定位中基于残差信息的改进抗差滤波	(171)
7.3.1	M 估计在单点定位中的应用	(171)
7.3.2	预测残差抗差 Kalman 滤波	(173)
8	星载 GNSS 卫星编队相对导航定位	(177)
8.1	整周模糊度的浮点解	(181)
8.1.1	动态方程中的病态性问题	(182)
8.1.2	浮点解的先验方差	(185)
8.2	整周模糊度搜索解法	(192)
8.2.1	整周模糊度的搜索空间	(192)
8.2.2	整周模糊度的降相关处理	(195)
8.2.3	模糊度搜索	(197)
8.3	整周模糊度的其他解法	(198)
8.3.1	模糊度函数法 (AMF)	(198)
8.3.2	双频 P 码伪距法	(199)
8.3.3	多频模糊度解法	(200)
8.4	整周模糊度的确定准则	(205)
8.4.1	Ratio 检验	(205)
8.4.2	重复性检验	(205)
8.4.3	相位残差多项式拟合检验	(205)
8.4.4	Ratio 变率检验法	(206)
	参考文献	(208)

1 绪 论

探索我们生活的星球和所处的宇宙秘密,一直是人类科学所追求的梦想和目标。1957年10月4日,世界第一颗人造地球卫星 SPUTNIK-1 发射成功,标志着空间科学进入了一个崭新的时代。随着卫星的出现,使得我们能够在地球以外获取地球和宇宙的信息。多年来,卫星所担负的任务已经证明卫星搜集信息的能力,更加推动了空间科学技术的发展。可以预计,卫星的应用将会为人类打开更多的科学技术大门,产生更多新的科学领域。不过,绝大部分卫星是一个系列化的独立卫星。在科学研究越来越复杂、要求越来越高的今天,这些卫星被设计得越来越大、越来越复杂,与之相伴的便是成本大幅提高,研制周期加长,风险增加。

21 世纪航天技术发展要达到的重要目标是要求空间航天器具备快速、高效、低成本、低风险、高生存能力。卫星小型化发展,成为当今航天器研制的趋势。而近几年在发展的众多卫星空间技术中,卫星编队空间探测因其灵活、高效以及低成本已成为空间测量及探索的重点关注和研究的热门技术。对于国家来说,这是新世纪航天领域的战略制高点之一。基于迅速发展的计算机技术、新材料和新能源技术的小卫星与编队卫星技术及以此为基础的空间虚拟探测技术,集中了目前为止几乎所有航天技术中所取得的先进技术,其应用展现出前所未有的优势。首先,在快速变化的地球系统环境探测及制天权的争夺中,以编队飞行技术构建特定功能的分布式空间系统,是达到“快速进入”的最有效途径之一。其次,就是成本显著降低。而更重要的是,编队飞行及空间虚拟探测技术具有低风险、高生存能力的特性。与大卫星相比,抵御风险能力强,外界对整个系统影响可控。此外,编队飞行还具有高灵活性,可以根据需要改变其系统的构型及指向,灵活改善或增减系统性能,可以实现单一大卫星无法实现的科学和技术使命,这是 21 世纪航天技术的前沿,是一个具有前瞻性、战略性和实用性的课题。

为了能够更加准确实时确定编队卫星之间的卫星状态,进行卫星自主导航和编队卫星自主控制,星载 GNSS 随着现代卫星导航定位系统的发展已成为编队卫星技术中重点研究的传感器之一。编队卫星技术虽然仍处于科学研究实验阶段,但正如中国科学院空间科学与应用研究中心的姜景山院士所说:“我国在编队飞行研究上比国外相差不过数年,如果及时努力,是极有希望与发达国家同步发展的。如果现在不抓紧,很可能被其他国家落下十几年甚至几十年,我们的机遇实在难得。编队飞行技术虽然现在还不成熟,但科技发展十分迅速,它并不遥远,就在眼前!”

1.1 卫星编队概念

近年来,随着我国神舟系列载人航天及嫦娥环月工程的实现,我国空间技术的发展越来越快。不久的将来,我国的嫦娥二号及无人登月将实现,空间站计划也将进入工程试验阶段,我

国空间技术已与国际空间技术接轨。空间科学的发展与卫星探测领域的发展息息相关。在全世界发射的 5000 多颗卫星中,探测卫星占很大一部分,但是这些探测卫星为达到更高的分辨率和覆盖能力,有效载荷越来越复杂,卫星越来越大,使卫星的研制成本大大提高,研制周期长,风险度增加。一些卫星重达十几吨,耗资几十亿美元,制造耗时甚至高达十几年。比如哈勃空间望远镜这样的大空间探测器,其图像分辨率受到单个卫星体积的限制,已不能完全满足当前空间探测任务的需要,提高图像质量的唯一方法就是增大它的尺寸,这在工程实现上是很难以达到的。应用卫星编队技术,则能很好地解决这方面的问题。在近 10 年中,包括美国宇航局、喷气推进实验室、美国空军以及欧洲太空局在内的多家著名航空航天研究机构都斥资开展了多个编队飞行任务的研究,卫星编队飞行技术及其应用研究已经取得了相当的成就。空间飞行器的编队飞行技术越来越引起世界航天领域的极大兴趣和广泛关注。

卫星编队的概念,是美国空军研究试验室受鸟群编队飞行的启发而定义的,并以此制订“Techsat-21”计划,其目的是设法开发廉价的、高能力的微小卫星群替换大的、昂贵的通信和遥感卫星。卫星编队飞行就是由若干颗卫星利用轨道的自然特性不加或策略性增加控制组成一定形状进行轨道飞行。在保持编队形状的同时,还绕地球运转。每颗卫星相互协同工作、相互联系,共同承担信号处理和有效载荷任务等工作。编队星座一般由一颗中心卫星和若干颗伴随卫星组成。从控制管理策略上可分为分布式编队及集中式编队;从轨道形式上分为串行编队、空间圆编队、水平圆编队、车轮编队、钟摆编队等,轨道类型涵盖 LEO、MEO、HEO、平动点轨道和日心轨道。

编队飞行与通常提到的卫星星座系统有概念上的区别。传统星座的设计目的并不是要组成一个大的传感器,而是想要增加对地观测的覆盖;它无需考虑多个航天器的相对位置和定向,而只要求星座中各航天器的位置保持在规定的精度控制区内,不致发生相互碰撞;或者提高时间分辨率,或单纯地增加有效荷载的个数;星座中各星之间是稀疏的,且一般没有星间信息交换。相对于卫星星座,卫星编队的主要技术特征有:编队飞行航天器间距离短,之间有通信和信息交换能力;各部分之间有动力学联系;编队飞行在应用上体现的是一个虚拟大型航天器;各航天器或小卫星的荷载可以是相同的也可以是不同的,但要求协同工作,完成复杂任务;编队飞行一般要求自主实时,同时编队航天器的信息与控制构成闭环。

这个概念提出后,很多国家政府和军事科研机构提出了一系列的研究计划,涉及干涉测量、电子侦察、导航定位、空间监视、空间站维护等诸多领域。美国宇航局(NASA)在 20 世纪末推出了“新千年计划”,提出天基分布式编队探测。在编队飞行的基础上通过编队能够完成多种功能,如通信、导航、对地观测、深空观测、空间攻防系统等。这样就形成了具有较高分辨率的强鲁棒性和强容错性的航天器系统。

现有的卫星编队项目工程有:

EO-1 是 NASA 新千年计划中的第一个地球观测的编队卫星,它与 Landsat-7(图 1-1)组成双星编队飞行,对地面同一区域进行多光谱成像观测,Landsat-7 是多航天器自主编队飞行的一个主要里程碑。

继 EO-1 以后,30 多项空间任务采用这项技术进行了对地及深空探测。其中 GRACE 是 NASA 和 JPL 发射的引力测量和气候试验任务,两颗卫星以一前一后的队形共轨编队飞行,如图 1-2 所示,应用精确的相对运动精化地球重力场模型,测量海面高程和气候的相关信息。

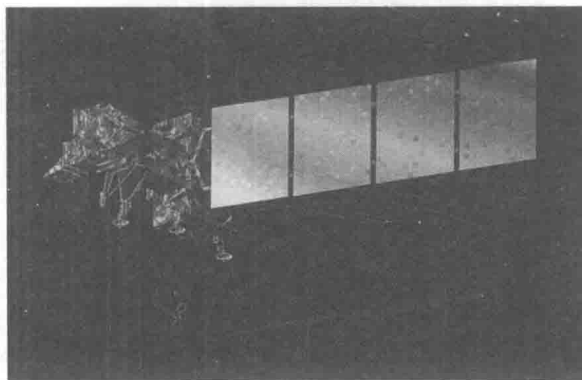


图 1-1 Landsat-7 卫星

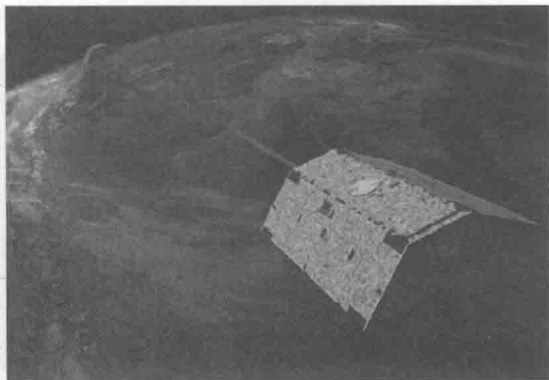


图 1-2 GRACE 卫星编队效果图

ETS-VII(图 1-3)是日本空间发展厅 1999 年进行的无人交会对接任务。包括两颗卫星呈对接状态发射入轨,在轨分离后对接,完成无人交会对接试验,是世界上首次无人在轨交会对接实验。这个试验中的两颗卫星都搭载有 GPS 接收机。

Orion(图 1-4)是 NASA 支持斯坦福大学大学生建造的一个典型的分布式编队卫星技术演示项目,由一颗 Orion 卫星和两颗 Emerald 卫星编队飞行,用于在轨验证编队飞行卫星的导航和控制技术,该项目首次利用载波相位差分 GPS 技术为近距离卫星提供精密的相对导航和实施姿态确定,可以在各种编队构型下用各种控制模式验证编队飞行控制技术。

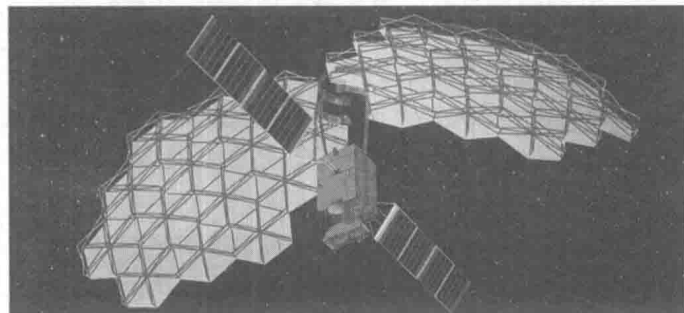


图 1-3 ETS-VII 卫星

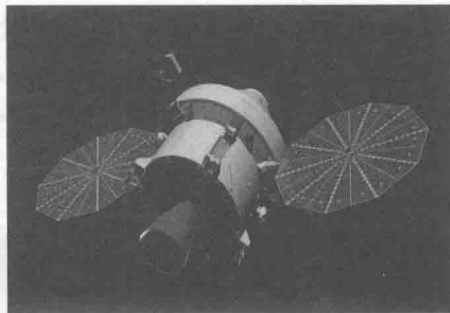


图 1-4 Orion 卫星演示模型

电离层观测编队系统 ION-F(图 1-5),由 3 颗纳米卫星编队组成,目的是研究卫星协同,调查影响天基雷达和其他分布式卫星测量的全球电离层作用、编队飞行和编队卫星间通信以及包括微推力器、磁姿态控制新技术。

“三角星座”编队飞行由 3 颗卫星组成,采用 GPS 导航,利用软件和通信系统相互联系,共同完成云层拍摄,构成三维立体图像。

双子星座任务由两颗小卫星组成,主要目标是在轨演示和验证激光测量技术、基于 GPS 的星间跟踪技术以及采用闭环编队保持策略的自主轨道控制技术。

准备实施的天基雷达系统(SBR)(图 1-6)计划将包括 40 组微小卫星、每组 8 颗卫星,成本将是 Techsat-21 的 1/3,而性能将是其 3 倍,组成的虚拟卫星对地面分辨率高达 0.1m,能够发现移动的目标。

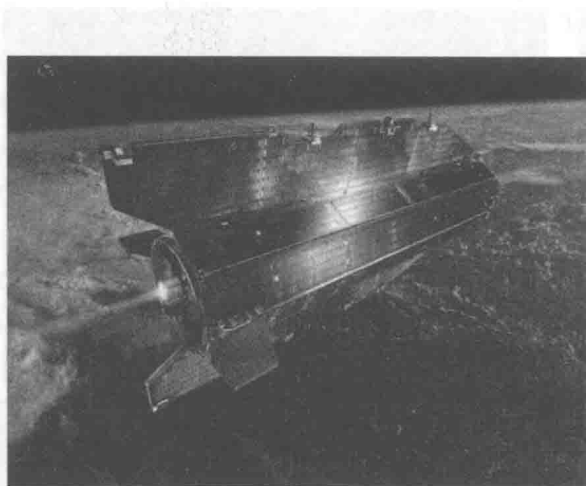


图 1-5 ION-F 卫星之一

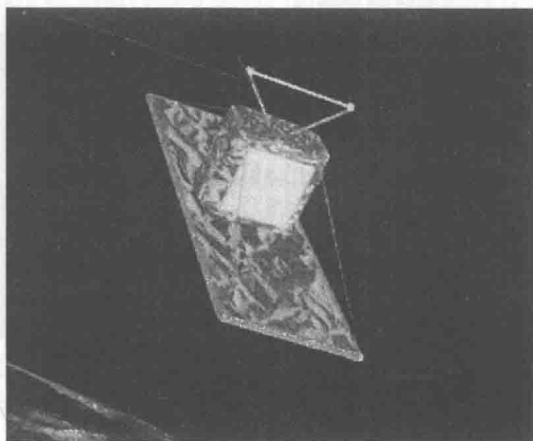


图 1-6 天基雷达系统(SBR)

很多空间任务,更多是从测量原理上要求多个航天器必须协同工作,从不同位置、多个角度来同时获得信息。小卫星群编队飞行技术的应用,可低成本地达到这种能力。通过卫星编队,可以构建大的观测孔径和长的测量基线来提高观测精度(图 1-7)。

2008 年 9 月 27 日 19 时 24 分我国神舟七号载人飞船载人航天飞行到第 31 圈时,释放了一颗伴飞小卫星,其效果如图 1-8 所示。这个伴星试验任务的成功,标志着我国成为世界上少数几个掌握空间编队伴飞技术的国家之一。其中择机进行对轨道舱形成编队伴随飞行的试验是此次伴星的任务之一。尽管在此次任务中,伴星对整个神舟七号载人航天飞行任务没有直接的支持作用,但是通过这次试验,为我国以后的大型航天器或空间实验室作技术储备,并利用伴随卫星技术为航天器的在轨执行航天器交会对接、航天员出舱活动、舱外结构安装、舱外人工修复等任务进行了技术论证。

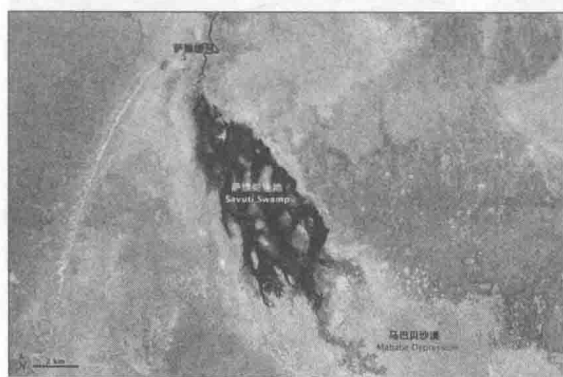


图 1-7 EO-1 卫星拍摄的洪水图片

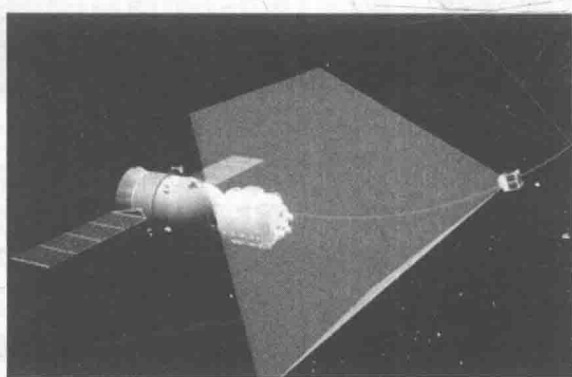


图 1-8 神舟七号成功释放一颗伴飞小卫星

2012 年 10 月实践九号卫星第一次完成了卫星编队飞行和高精度 GPS 星间测量试验,验证了卫星编队建立与保持技术。2013 年 8 月正式交付,投入使用。该项目由国防科技工业局负责组织实施,中国航天科技公司所属航天东方红卫星公司研制。实践九号搭载了一批新成

果、新产品,将促进我国宇航产品的升级换代,降低卫星研制风险。

2013年,西班牙引领的欧洲航天局 Proba-3 项目旨在展示两颗卫星如何保持毫米以下精度距离的编队飞行,使其看起来就像一个物体在移动。该项目成为首个两颗卫星组合在太空中穿梭的飞行测试任务,这两颗卫星同时指向可选择的方向,距离精度在毫米以下。两颗卫星质量分别约为 340kg 和 200kg,于 2017 年一同发射送入太空,进入高偏心轨道才分离。轨道近地点离地距离仅为 600km。其中一项编队飞行试验是:一颗卫星负责挡住太阳,另一颗卫星在 150m 远处检测太阳的日冕,获得前所未有的细节信息。那颗负责挡住太阳的卫星将制造出人造日食从而帮助另一颗卫星收集数据。类似技术已经在 1975 年的阿波罗-索宇兹项目中尝试过。

未来的空间站也将是一个没有直接结构和动力约束但存在运动约束的多航天器编队系统。如图 1-9 所示,利用小卫星编队伴飞对空间站及其他目标进行观测并为其服务,可以替代宇航员执行必要的观测任务与操作,例如和平号空间站 X-M Inspector 卫星、Escort Inspector。

从国际上编队飞行技术及相关技术的发展来看,编队飞行已成为世界空间大国未来几十年空间发展的重点领域之一。这一技术领域将会是 21 世纪空间技术的一个具有前瞻性、战略性和实用性的课题。

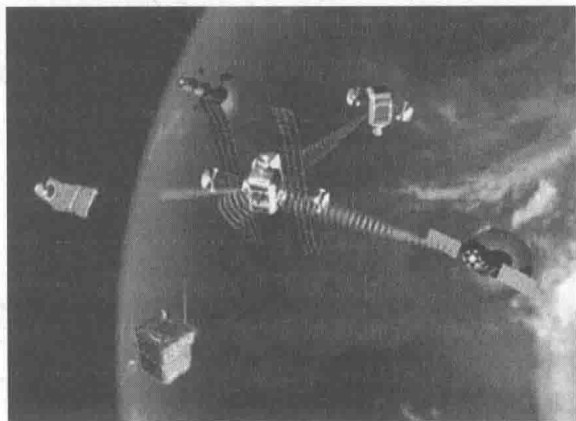


图 1-9 空间站与伴飞卫星模拟图

1.2 卫星编队的特点

相比于单个大型卫星独立飞行,卫星编队飞行技术的优点明显:

(1)编队飞行技术降低了成本。来自美国的相关资料显示,完成同一项任务,发射一组编队飞行卫星所需的成本,只有发射相同功能的单一大型卫星的 1/3。

(2)星群编队飞行的几何形状和卫星的数目可以根据任务需求来设计与配置,从而具有可增长性和可重构性,既可以通过阶段性配置逐步提高和扩充星群性能,也可以通过“剪裁”方式来适应逐步恶化的外界条件,还可以通过有限变轨机动修改基线或星群间卫星的相对位置来适应变化了的飞行任务,满足了对任务“随机应变”的要求。这种新型卫星系统还有一个独特性能,即通过不同类型的小卫星之间的替换来转换卫星系统的用途。

(3)编队飞行技术具有低风险、高生存能力的特性。与大卫星相比,即使单个卫星失效,其损失也较小,对整个系统的影响也是有限的,可以快速补充,提高了系统的生存能力。所冒的风险较小,冗余度较高。

(4)结构化的编队还会提高测量数据精度。但是这要求编队飞行的航天器之间内部相互协调,通过通信、传感、导航、定位等使编队航天器智能化,能够通过比对相互间的数据检测到姿态、位置的变化,从而通过适当的在轨机动维持各自的位置。

这项技术的出现及应用,引发了空间技术的革命。在空间探测科学中,大群廉价的、编队飞行的卫星将替代昂贵的航天器平台,对地球的变化进行连续全方位、有冗余度的观测。例如美国的“地球使命”MTPE 计划就可以将多种遥感小卫星组成星座编队飞行,最终得出地球某特定地区的综合信息,实现气象学、海洋学、地形学、地磁学等地球学科的关系建立。在军事侦察方面,根据军事航天侦察系统获取信息的能力与航天器的物理尺寸有联系,发射多个具有特定光学功能的成像卫星编队飞行构型,形成巨大的分布式合成孔径雷达,能够得到更大的视角和更高的空间分辨率,辅助军用侦察卫星,变传统的俯视图为立体视图,提升作战侦察分析能力,达到侦察的效果。由于卫星编队飞行机动能力强、成本低,具有警卫及战斗作用的编队卫星将在未来的“空间战”中,随着任务的发展,卫星编队甚至可以分化战斗功能形成空间武器群,仿效地面战场,分化出远程狙击卫星、盾卫星、作战指挥卫星、维修卫星、掩护卫星等,这种编队卫星平日维护大型卫星或空间站,战时打击敌方空间力量和地面力量。

1.3 卫星编队的发展趋势

1.3.1 加强与扩大卫星编队飞行的应用领域

目前国际上对小卫星的编队飞行已进行了很多研究,其中相当大的一部分尚处于技术验证探索阶段。虽然也有一些进入商业运营,但是相对于需求蓬勃的军事、民用市场而言,小卫星编队应用飞行的实施力度还不够。所以,在未来几年中,如何加快小卫星编队飞行系统的应用速度、拓展小卫星编队飞行的应用市场,是国际空间技术领域所面临的主要问题。同时,尽快弥补目前小卫星编队飞行试验探索中所发现的缺陷与不足,也是亟待攻关的技术问题。

1.3.2 加强小卫星编队飞行各组成子系统及相关技术的研究

需要加强小卫星编队飞行各个组成系统及相关技术的研究,协调技术发展与应用的关系,促进产业链的形成,提高经济效益。需要发展的相关技术有如下几个方面:

(1)加强提高单颗小卫星性能的研究。主要是指加快小卫星技术产业化过程,在完成卫星总体设计到各子系统设计制造产业化的基础上,降低小卫星成本,同时提高单颗卫星的有效载荷能力,由此提高编队飞行的系统性能。

(2)加大利用新技术的力度,研制高精度的小卫星自主导航设备。由于目前小卫星编队飞行主要应用在空间探测与成像及空间通信与定位等方面,因此,加强高精度传感器的研究对卫星编队飞行技术的发展意义重大。高精度的距离与姿态测定传感器的研制成功,使得高分辨率的空间虚拟仪器的建立成为可能;同时,相关传感器技术的发展也会进一步地扩展编队飞行的应用范围。

(3)加强星间、星地间通信链路的建立。卫星编队飞行带来的大量实时数据和控制指令的传播与处理,特别需要进一步发展星间、星地间的通信链路。传统的编码方式和数据处理器难以很好地满足多星编队飞行的需要。同时,传统的通信设备也不利于多星编队飞行的管理。

(4)加强编队飞行控制算法的研究。在编队飞行过程中对各个飞行器轨道与姿态的控制

要求进一步发展编队飞行控制算法。如何采用新的有效模型和更新的算法,增加系统的实时控制与应用,也是需要加强研究的方面。

(5)加大人工智能的研究。在未来的编队飞行中引入人工智能,加强编队卫星的自主导航与控制,实现任务的自动分配与协调是技术发展的趋势。因此,必须加强相关技术的研究,建立相应的数学模型,并结合相应的算法,发展相关的人工智能技术,并加以试验应用。

1.3.3 编队卫星标准化研究

在建立小卫星的相关技术标准之后,应加强编队飞行相关技术标准的建立,以便于空间任务的调整变换、飞行器的更换和队形的重构等,其主要内容如下:

(1)构建标准化的空间平台。利用标准化的小卫星,采用标准化的星间链路、通信接口和编码方式,构建标准化的空间技术平台。

(2)采用标准化的控制算法。尽可能采用标准化的控制算法来控制空间平台的队形及各个小卫星的姿态,以减少控制算法设计研究环节的资源消耗,加速任务的开发,降低成本。

(3)采用标准化的队形设计。针对常见的空间任务,设计相应的标准编队队形,减少该环节的消耗,并针对不同的任务建立不同的编队队形库,可根据需求加以选用。

完成上述3个部分的标准化设计后,就可以针对特殊的任务需求选用特殊的有效载荷,搭载在相应的组成编队的标准小卫星空间平台上,然后用相应的控制算法,采用相应的编队队形,在极短的时间内完成任务的开发。那时,空间科技团体开发一项新的空间计划就将像现在组装一台普通的计算机一样,即根据不同的用途(空间任务),选用相关的配件(标准化小卫星及有效载荷),安装相应的操作系统(控制算法等),此后就是应用的管理与控制了。

综上所述,从国际航天领域的发展趋势来看,对航天器小型化、低成本和高性能的要求也在不断提高。从应用角度来看,小卫星编队系统也可以定义为广义的大卫星。通过研究分析,笔者认为,在研究卫星编队飞行及其应用时,应该从两点入手:一是从关键技术入手,如从系统优化管理入手,研究如何减少地面的支持、提高卫星的自主性,也可以从自主导航与控制入手;二是从应用入手,如从研究分布式载荷或研究编队系统的协同飞行工作入手,获得有价值的科学数据等。

1.4 星载 GNSS 编队飞行的意义

快速、高效、低成本、低风险、高生存能力是21世纪航天技术发展要达到的重要目标。而像小卫星这种航天器编队飞行,能够使多分布的小卫星行动调整为好像一个一样,从成本、覆盖面和功能作用上都比单个大卫星得到很大的改善,比如恒星干涉测量、重力测量及合成孔径雷达等技术的精度得到改善或提高。但是航天器编队飞行技术需要编队状态的控制,也就是说知道编队航天器中各航天器的相对位置是很重要的。

现代测控技术中将GNSS作为一种导航传感器是一种发展趋势,它将可以替代3个分立的传感器系统,对编队航天器进行绝对和相对测量,可以同时获得位置、速度和时间,是一种高效的、高精度的技术手段,现代航天器编队控制对GNSS进行相对导航提出更高的要求。