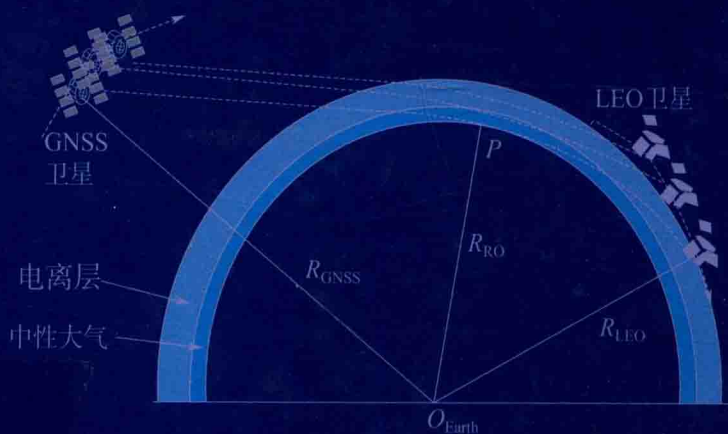




航天科技图书出版基金资助

GNSS掩星大气探测星座设计与构型控制方法研究

梁斌 李成 魏世隆 著



 中国宇航出版社

航天科技图书出版

GNSS 掩星大气探测星座 设计与构型控制方法研究

梁 斌 李 成 魏世隆 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

GNSS 掩星大气探测星座设计与构型控制方法研究 /
梁斌, 李成, 魏世隆著. --北京: 中国宇航出版社,
2018. 5

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1461 - 9

I. ①G… II. ①梁… ②李… ③魏… III. ①卫星导
航—全球定位系统—应用—掩星—大气探测—研究
IV. ①P1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 079669 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版

发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号

邮编 100830

(010) 60286808

(010) 68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010) 60286888

(010) 68371900

(010) 60286887

(010) 60286804 (传真)

零售店 读者服务部

(010) 68371105

承印 河北画中国画印刷科技有限公司

版次 2018 年 5 月第 1 版

2018 年 5 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 8.25

字数 230 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1461 - 9

定价 68.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 天基 GNSS 掩星大气探测技术研究现状	3
1.2.2 卫星星座研究现状	13
1.2.3 GNSS 掩星大气探测星座研究现状	20
1.2.4 GNSS 掩星大气探测星座部署方法研究现状	23
1.2.5 星座构型保持策略研究现状	25
1.3 主要研究内容及章节安排	27
第 2 章 GNSS 掩星大气探测星座研究	30
2.1 引言	30
2.2 天基 GNSS 掩星大气探测方法	31
2.2.1 地球大气	31
2.2.2 GNSS 气象学	32
2.2.3 GNSS 运行状态	33
2.2.4 天基 GNSS 掩星大气探测原理	37
2.2.5 天基 GNSS 掩星大气探测特点	38
2.3 GNSS 掩星大气探测星座研究	39
2.3.1 GNSS 掩星大气探测系统组成	39
2.3.2 GNSS 掩星大气探测任务分析	42

2.3.3	GNSS 掩星大气探测星座研究框架	45
2.4	GNSS 掩星大气探测星座轨道动力学建模	48
2.4.1	星座构型描述	48
2.4.2	LEO 卫星轨道摄动方程	49
2.4.3	卫星轨道参数转换算法	52
2.4.4	卫星轨道与星座模型及符号定义	55
2.5	本章小结	56
第 3 章	GNSS 掩星大气探测星座性能预估方法	57
3.1	引言	57
3.2	前向掩星模拟	58
3.2.1	方法描述与问题分析	58
3.2.2	GNSS RO 信号传播路径模拟方案	59
3.2.3	基于指数大气模型的前向掩星模拟算法	66
3.2.4	仿真分析	70
3.3	GNSS 掩星大气探测星座探测性能评价指标	74
3.3.1	GNSS 掩星大气探测数据需求分析	74
3.3.2	掩星探测量与探测域指标	75
3.3.3	“双栅”均匀度评价指标	77
3.4	GNSS 掩星大气探测性能预估仿真系统设计与实现	79
3.4.1	组成与功能设计	79
3.4.2	工作模式设计	80
3.4.3	功能模块设计	83
3.4.4	仿真试验	86
3.5	本章小结	89

第 4 章 GNSS 掩星大气探测星座设计	90
4.1 引言	90
4.2 虚拟“星-地”遥感建模方法	91
4.2.1 GNSS 掩星测点分布特性分析	91
4.2.2 虚拟“星-地”遥感建模	92
4.3 GNSS 掩星大气探测星座设计准则	98
4.3.1 星座参数对探测量影响性分析	98
4.3.2 星座参数对探测覆盖域影响性分析	101
4.3.3 星座参数对探测覆盖均匀度影响性分析	104
4.3.4 GNSS 掩星大气探测星座参数设计准则	105
4.4 智能优化算法	107
4.4.1 遗传算法	108
4.4.2 蚁群算法	109
4.5 基于“双栅”评价指标的掩星大气探测星座优化设计	112
4.5.1 GPS 掩星大气探测星座优化设计	112
4.5.2 BDS 掩星大气探测星座优化设计	113
4.5.3 BDS+GPS 掩星大气探测星座优化设计	117
4.5.4 4-GNSS 掩星大气探测星座优化设计	121
4.5.5 仿真分析	125
4.6 本章小结	130
第 5 章 GNSS 掩星大气探测星座部署方法与策略	132
5.1 引言	132
5.2 问题描述	133
5.3 玫瑰星座部署方法	133

5.3.1	玫瑰星座部署原理	133
5.3.2	停泊轨道设计	138
5.3.3	星座部署次序规划	142
5.4	玫瑰星座部署策略设计	146
5.4.1	星座部署影响因素分析	146
5.4.2	单星部署轨道机动时序规划	158
5.5	GNSS 掩星大气探测星座部署策略仿真	169
5.5.1	仿真参数设置	169
5.5.2	仿真结果	171
5.6	本章小结	177
第 6 章	GNSS 掩星大气探测星座构型保持策略	178
6.1	引言	178
6.2	星座构型漂移特性分析	178
6.2.1	标称构型稳定性分析	179
6.2.2	偏差构型漂移特性分析	180
6.3	星座构型保持策略	184
6.3.1	相对升交点赤经保持策略	184
6.3.2	绝对相位保持策略	185
6.3.3	相对相位保持策略	188
6.4	构型保持策略仿真	189
6.4.1	仿真参数设置	189
6.4.2	绝对相位保持策略仿真	190
6.4.3	相对相位保持策略仿真	191
6.4.4	比较分析	199
6.5	本章小结	199

第 7 章 星座部署与构型保持决策系统的设计与实现	200
7.1 引言	200
7.2 组成与功能设计	200
7.3 工作模式设计	205
7.3.1 星座部署仿真工作模式设计	205
7.3.2 掩星星座构型保持仿真工作模式设计	207
7.4 功能模块设计	209
7.4.1 仿真调度与数据管理模块	209
7.4.2 用户交互功能模块	210
7.4.3 星座部署策略模块	211
7.4.4 星座构型保持策略模块	212
7.4.5 轨道仿真模块	212
7.4.6 轨道预报模块	216
7.4.7 数据可视化功能模块	217
7.4.8 网络通信接口功能模块	217
7.5 仿真试验	218
7.5.1 星座部署决策试验	218
7.5.2 星座构型保持决策试验	227
7.6 本章小结	238
第 8 章 结论	239
参考文献	241

第 1 章 绪论

1.1 课题背景及研究目的和意义

随着科技的发展和人类活动向高层大气的拓展,天气、气候和环境变化及其影响、预测、控制研究是目前大气科学研究的重要前沿,也是航天工业发展和各国国家安全、公共安全以及人类与自然和谐可持续发展的保障^[1]。

20 世纪 90 年代,出现了一门以美国全球定位系统 (GPS) 导航无线电信号为信源,利用无线电掩星 (RO) 大气探测技术对地球大气进行间接探测的新兴学科,即 GPS 气象学^[2]。GPS 气象学是一门融合卫星动力学、大地测量学和气象学的交叉学科。近年来,俄罗斯格洛纳斯全球导航卫星系统 (GLONASS)、欧洲伽利略卫星导航定位系统 (Galileo) 以及我国的北斗 (BDS) 等全球导航定位系统的组建和完善,扩充了用于大气探测的无线电信号来源。“GPS 气象学”这一名词逐步被“全球导航卫星系统 (GNSS) 气象学”所取代。基于 GNSS 气象学的 GNSS 掩星大气探测相比传统大气探测手段具有垂直分辨率高的优点,特别是天基 GNSS 掩星大气探测更具有长期稳定性好、可实现全球覆盖、可全天候获取中性大气和电离层环境信息等显著优势,极适合用于大气模型的搭建及修正、近实时大气探测及大气参数资料累积,蕴含巨大的科研及应用价值,日渐成为相关学科的研究热点^[2-4]。

自美国于 1995 年发射首颗 GNSS 掩星大气探测技术试验卫星以来,美国、德国和包括我国在内的十多个国家和组织已相继发射了 20 余颗具备 GNSS 掩星大气探测功能的低轨道 (LEO) 卫星。为了

探测到足够多的掩星事件,需要用一定数量的卫星构成卫星星座进行 GNSS 掩星大气探测。近年来,美国和欧盟已从试验型单星系统向业务型多星星座系统研究过渡,且取得了一定进展。

与发达国家相比,我国气象研究应用中存在大气基础观测资料不完整、不系统、自主大气探测数据不足的现状,数值天气预报系统与欧美同类系统相比精准确度存在差距。作为一个气象大国、军事大国、航天大国,我国对 GNSS 无线电掩星大气探测卫星系统技术的掌握和应用势在必行。

作为一门新兴技术,GNSS 掩星大气探测技术拓展了 LEO 卫星应用领域,开辟了崭新的航天任务类型。然而,国内外对 GNSS 掩星大气探测卫星系统的研究主要围绕探测数据反演算法和星载 GNSS 掩星接收机追踪记录掩星信号技术展开,探测星座相关技术研究历程较短,研究成果寥寥^[5-12]。随着星载接收机和数据反演技术的快速发展和成熟,GNSS 掩星大气探测星座技术的相对滞后对 GNSS 掩星大气探测技术发展应用的阻碍日益明显^[13-18]。由于 GNSS 掩星大气探测具有临边探测特点,GNSS 掩星大气探测星座与通信、导航、对地光学遥感等建立于“星-地”关系基础上的常规卫星星座在任务形式上存在显著不同,需融合 GNSS 导航定位技术、无线电掩星技术与 LEO 卫星星座技术,基于“星-星-地”关系建立星座任务模型。这使得 GNSS 掩星大气探测星座研究从根本上难以套用常规星座研究成果,必须建立 GNSS 掩星大气探测卫星星座研究这一崭新的星座研究体系,从而突破 GNSS 掩星大气探测系统工程化应用的瓶颈。

为弥补我国现阶段大气探测技术的缺陷,改善我国气象研究应用现状,加快掌握和应用 GNSS 掩星大气探测技术的步伐,本书论述了“GNSS 掩星大气探测卫星星座设计与部署策略研究”这一课题,对 GNSS 掩星大气探测原理与方法、GNSS 掩星大气探测星座探测性能分析与测度、GNSS 掩星大气探测星座设计、GNSS 掩星大气探测星座部署和 GNSS 掩星大气探测星座地面仿真系统等方面展

开研究,为 GNSS 掩星大气探测卫星星座的研制与组建奠定基础,可提高我国 GNSS 掩星大气探测技术工程化应用能力。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 天基 GNSS 掩星大气探测技术研究现状

自 20 世纪末 GNSS 掩星大气探测技术问世以来,以美国为首的气象大国纷纷启动并开展了一系列的相关理论研究及在轨验证试验,取得了令人瞩目的成绩,天基 GNSS 掩星大气探测技术的优势和效益日益彰显。本节将对美国、德国等在这一领域处于领先地位的国家与地区的天基 GNSS 掩星大气探测技术研究情况进行综述。通过国外 GNSS 掩星大气探测卫星系统宝贵的成功案例,探索我国在 GNSS 掩星大气探测卫星星座系统领域的发展思路。

1.2.1.1 美国 GNSS 掩星大气探测项目

拥有 GPS 的美国早在 20 世纪 90 年代就已经开始了 GNSS 掩星大气探测技术研究,并取得了卓越的成果,在国际上一直处于领先地位。

(1) GPS 气象试验计划

GPS 气象试验计划 (GPS/MET) 于 1993 年公布,于 1995 年 4 月发射全球首颗试验性 GNSS 无线电掩星大气探测卫星——微型实验室-1 (MicroLab-1),1997 年试验结束。该项目是全球首个 GNSS 掩星大气探测项目,通过探测 GPS RO 事件进行地球大气探测。

MicroLab-1 卫星由美国大学大气研究联合会研制,卫星质量约 68 kg,卫星轨道高度 775 km,轨道倾角 70° ,采用重力梯度杆实现卫星姿态控制。通过在轨飞行试验,演示验证 GNSS 掩星大气探测卫星功能,在轨状态如图 1-1 所示。MicroLab-1 星上主载荷为基于地面 GPS 接收机改造的星载无码 GPS 接收仪 TRSR,可同时跟踪 8 颗 GPS 卫星的信号。由于 MicroLab-1 卫星天线指向卫星运动

反方向, 只可以探测下降掩星, 每日探测掩星数量约为 250 次。此外, 因受星上存储器及早期 GPS 地面站覆盖限制, 使得 MicroLab-1 卫星在最优运行状态下每天探测掩星事件不足 150 次。MicroLab-1 获取的掩星数据经反演给出了 GPS/MET 掩星探测中传播路径弯曲角和大气折射率的垂直剖面, 首次从理论和技术上证实了 GNSS 无线电掩星探测技术用于探测地球大气的可行性^[19]。

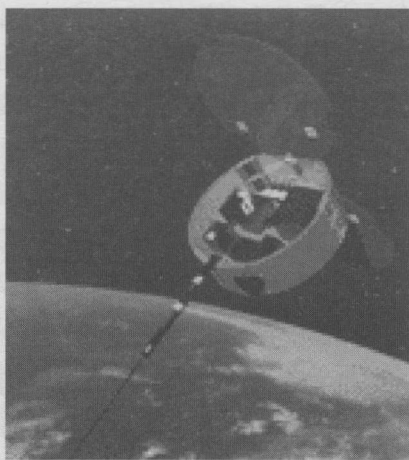


图 1-1 MicroLab-1 在轨演示图

(2) 阿根廷科学卫星计划 (SAC-C)

SAC-C 项目是由美国和阿根廷合作的一项国际卫星计划。多功能卫星 SAC-C 于 2000 年 11 月发射, 卫星质量约 475 kg, 卫星轨道高度 705 km, 轨道倾角 98.2° , 星上搭载由美国国家航空航天局喷气推进实验室 (JPL) 研制的星载 GPS 掩星接收仪 BlackJack, 作为 GNSS 掩星大气探测试验载荷。在 2001 年内, 受掩星接收仪跟踪算法限制, SAC-C 只能观测下降掩星事件, 每天探测掩星事件约 250 次。2005 年, JPL 改进了 BlackJack 的掩星跟踪算法, 不再采用锁相环模式记录无线电信号, 转而改用开环跟踪技术, 解决了之前无法探测上升掩星的难题。SAC-C 在轨验证了该改进算法可同时实现上升和下沉掩星事件探测, 掩星探测数量提高至约 500 次/天^[20]。

(3) 地球重力场测量及气候试验项目

美国与德国合作的重力校正及气候试验项目 (GRACE) 是以地球重力场测量为主的多任务卫星计划, 于 2002 年 3 月发射。GRACE 项目中包含两颗 LEO 卫星, 单星质量约 487 kg, 轨道高度 485 km, 轨道倾角 89° , 两颗卫星共面相距 220 km, 在轨状态如图 1-2 所示。每颗 GRACE 卫星上均搭载了 JPL 研制的星载 GPS 掩星接收仪 BlackJack, 在轨演示试验 GNSS 掩星大气探测技术。每颗 GRACE 卫星仅在单侧安装了一组 GPS 接收天线, 相应地, 每颗卫星每天探测掩星事件约为 200~250 次^[21]。

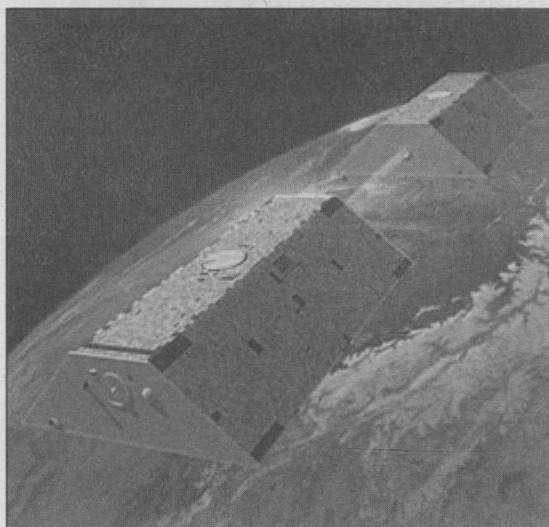


图 1-2 GRACE 在轨演示图

(4) 气象学、电离层及气候的星座观测系统 (COSMIC) 星座
COSMIC 系列项目是由美国大学大气研究联合组织发起, 美国与台湾地区等多方参与的 GNSS 掩星大气探测星座系列计划^[22]。

FORMOSAT-3/COSMIC 是全球首个 GNSS 掩星大气探测卫星星座在轨演示试验计划, 星座内卫星编号为 FM1~FM6, 于 2006 年 4 月经一箭六星发射进入高约 516 km 的圆形停泊轨道上。利用轨

道高度差产生的轨道面进动速度差和卫星轨道角速度差,通过分配星座内各卫星在停泊轨道上的运行时间,分散星座内卫星间相对位置,至 2007 年 12 月完成星座部署。星座内卫星工作轨道高度为 800 km (FM3 因太阳翼故障停留在 720 km 高度轨道运行),轨道倾角为 72° 。相邻轨道升交点赤经间隔 30° ,纬度幅角间隔 52.5° ,星座在轨状态如图 1-3 所示。COSMIC 卫星星座由美国轨道科学公司负责卫星总体研制,单星质量约 61 kg,星上搭载 JPL 设计的星载 GPS 掩星接收机 IGOR,在卫星飞行前后方向各装有一组高增益掩星探测天线,可实现上升和下降掩星事件探测。除大气探测外,COSMIC 卫星还能进行地球重力场探测,并具有接收卫星定位信息等功能^[22-25]。

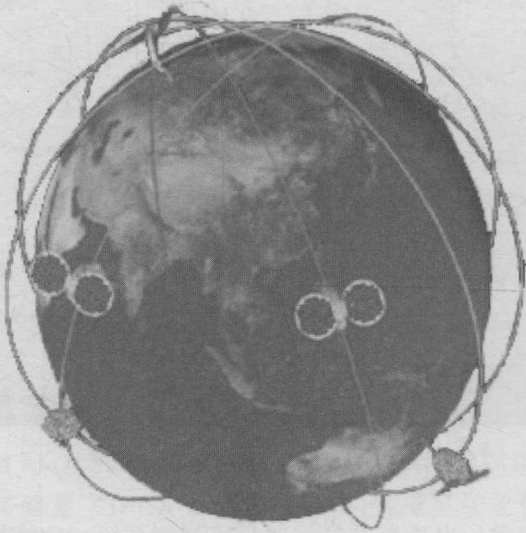


图 1-3 COSMIC 卫星星座

作为试验卫星星座,COSMIC 星座研制中采用了较多的测试性设计。在星座部署初期,COSMIC 研发小组为缩减星座部署时长,曾设想将星座内轨道面间隔从原计划 30° 降至 24° 。后经模拟仿真发

现, 轨道面间隔减小所造成的掩星探测数据分布均匀度代价较大。因此, 在约 1 个月的研究讨论后, 才继续在原设计方案上开展星座部署。此外, 由于卫星平台性能不稳定, COSMIC 在轨运行期间出现多重技术故障, 造成星上载荷间断性工作, 天线信噪比降低等问题, 减少了掩星数据获取量。2006—2011 年间, COSMIC 星座实际掩星探测量均值约 2 500 次/天, 仅为期望值的 5/6, 近似等同于星座内一颗卫星失效。同时, 由于卫星姿态控制不稳定等原因, 所获取的原始掩星探测数据只有 60%~70% 可有效处理用于气象观测研究^[3-5]。因此, COSMIC 系统每日仅获取约 2 000 组有效掩星数据, 低于期望值 20%。由于存在间断性工作的情况, 星座所获取的掩星事件分布随机性增强, 掩星事件的时空分布均匀性不理想^[22,26-29]。

虽然存在瑕疵, COSMIC 仍取得了巨大成功, 拥有来自包括我国在内的 50 多个国家和地区的近 800 个研究机构用户和合作伙伴, 其数据产品已被成功用于大气科学基础研究、同化气象卫星等其他大气探测技术所得数据资料、提升数值气象预报模型精度和电离层电子密度探测等研究和应用, 并激发了气象研究者对此类数据的强烈需求^[30-34]。它的成功彰显了 GNSS 掩星大气探测星座的应用价值, 并为未来的 GNSS 掩星大气探测星座的研制提供了宝贵的经验。

筹备中的 FORMOSAT-7/COSMIC II 计划是首个业务型 GNSS 掩星大气探测星座项目, 在 COSMIC 研制经验的基础上进行了大量改进。一方面, COSMIC II 星座将选用新型 GNSS 掩星接收机, 在探测 GPS 掩星信号的基础上, 将增添 Galileo/GLONASS 掩星事件跟踪探测功能; 另一方面, COSMIC II 卫星相比 COSMIC 卫星增添了系统稳定性、可靠性和冗余性设计理念, 卫星不再沿用 MicroSat 平台, 卫星质量增至约 150 kg。此外, COSMIC II 星座还增添了低倾角轨道卫星子星座来扩充低纬度带掩星探测数据^[35]。

COSMIC II 是一个预期中相当先进的系统, 其星座构型经过了长时间的论证, 论证中考虑将 12 颗卫星分别放置于 24° 倾角和 72° 倾

角的圆形轨道上,形成了 12+0、8+4、6+6、4+8 等多种备选构型方案。经过数值仿真分析比较,以掩星事件分布均匀度最优为目标,最终选择了 6+6 构型作为新的星座构型方案,星座构型如图 1-4 所示。COSMIC II 各备选构型方案及 COSMIC 星座的全球掩星点分布对比如图 1-5 所示^[36,37]。

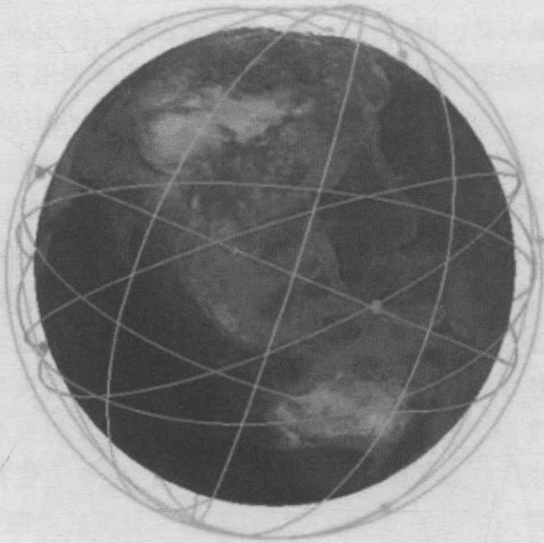


图 1-4 COSMIC II 卫星星座

COSMIC II 星座部署分为两个阶段实施,每阶段各部署一组探测卫星,每组 6 颗卫星。第一阶段计划于 2018 年发射部署,每颗星一个轨道面,均布于 24° 倾角、550 km 高度的低倾角轨道上,形成中低纬度区域掩星探测能力,第二阶段预计于 2020 年发射部署,每颗星一个轨道面,均布于 72° 倾角、720 km 高度的高倾角轨道,形成全球 12 000 次/天的掩星探测能力。其中,第二阶段与 6 颗业务卫星一同发射的还将有 1 颗台湾地区研制的小卫星,以验证台湾地区独立研制生产小卫星的能力,并可作为星座系统的备份星。