



卫星星座理论与设计

张育林 范丽 著
张艳 项军华



科学出版社

www.sciencep.com

P185
548
1=

卫星星座理论与设计

Theory and Design of Satellite Constellations

张育林 范丽 张艳 项军华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了卫星星座的基本理论和方法,并对星座设计、部署、运行控制与维持过程中面临的主要问题给出了解决途径。内容主要包括星座的基本概念,星座的构型及动力学特性,星座的构型设计、系统设计以及提高星座稳定性的摄动补偿设计方法,星座维持和重构控制的策略和方法,星座备份和阶段部署策略和方法,基于星间观测的星座自主导航方法,导航、预警、通信等星座的分析设计实例等。

本书适合航空宇航科学与技术和控制理论与工程领域的科学研究和工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业高年级本科生及研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星星座理论与设计=Theory and Design of Satellite Constellations/张育林等著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022897-0

I. 卫… II. 张… III. 卫星-星座-研究 IV. P185

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 135040 号

责任编辑:胡 凯/责任校对:陈玉凤

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 9 月第一次印刷 印张: 25

印数: 1—2 200 字数: 490 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

卫星由于其相对地球表面的高远位置优势,在通信广播、导航定位、对地观测等领域得到了广泛应用,产生了巨大的经济效益与社会效益,并深刻而广泛地改变了人们的生活方式。

卫星是在地球万有引力作用下运动的飞行器,始终以一定的速度绕地球质心飞行,除地球静止轨道卫星外,卫星不能够固定在地球表面某点的上空,其覆盖区域总是随时间的变化而不断变化,而且这种变化规律严格受轨道高度和轨道倾角等因素的制约。因此,在大多数情况下,单靠一颗卫星难以实现全球或特定区域的不间断通信和观测。由于卫星在轨道上的运动在时间和空间上遵循一定的规律,利用多颗卫星相互补充和衔接共同完成同一任务,既能同时覆盖更为广阔的区域,也能使特定区域的覆盖特性得到改善,从而保证目标区域能够以任务要求的时间间隔或覆盖重数为卫星覆盖。卫星星座(简称“星座”)就是指由多颗卫星组成的、卫星轨道形成稳定的空间几何构型、卫星之间保持固定的时空关系从而完成特定航天任务的卫星系统。卫星星座能够更大程度地发挥卫星的作用,拓展卫星的应用形式,其在全球性、多重性、时效性、连续性等方面具有单颗卫星所无法比拟的优势。

卫星星座是由多颗卫星组合而成的系统,卫星的轨道设计、导航与控制等是星座理论与设计的基础。由于星座中所有卫星的轨道运行必须满足一定的空间约束,所以星座中卫星与卫星之间存在着一定的轨道运动耦合关系,这种耦合关系不仅体现在星座的轨道动力学关系上,还体现在星座的各种性能参数上。在进行卫星星座的分析与设计时,必须将星座中的所有卫星作为一个有机整体加以研究,相对于单颗卫星而言,星座从分析、设计到运行与维持控制都面临着前所未有的挑战。平衡星座成本与性能、降低运行维持代价、提高星座的稳定运行、协同工作与自主生存能力是发展星座系统要解决的主要问题。这就需要从星座构型及其与系统各种性能之间关系的分析,多种约束及边界条件下星座的优化设计,提高星座稳定性的参数设计,构型保持控制策略确定,系统重构、备份、部署以及星座自主导航方法等方面寻求有效的技术途径。虽然星座理论与设计方法得到了较为广泛的研究和发展,但早期的星座理论主要集中在星座构型和覆盖的几何理论研究上,近年来虽然针对特定星座系统也有关于星座优化设计、构型维持与重构、自主导航等一系列研究,但这些研究比较分散。就作者所知,目前还没有系统研究星座理论与设计的专门著作。

本书是作者关于卫星星座研究工作的系统总结,全面介绍了卫星星座的基本理

论和方法,并结合实际应用,对星座设计、部署、运行控制与维持过程中面临的主要问题给出了解决途径。全书共分 17 章,第一章介绍了星座的基本概念、典型的星座系统以及国内外的研究进展。第二章介绍了星座的构型及动力学特性等基本理论问题。第三、四、五章分别介绍了星座的优化设计方法,包括构型设计、系统设计以及提高星座稳定性的摄动补偿设计方法等。第六、七章分别介绍了星座维持和重构控制的策略与方法。第八、九章分别介绍了星座备份和阶段部署策略和方法。第十、十一、十二、十三、十四章分别系统介绍了基于星间观测的星座自主导航方法,并利用 GPS 星历给出了仿真试验验证结果。第十五、十六、十七章分别给出了导航、预警、通信等星座的分析设计实例。

本书第十七章的部分内容由张雅声博士撰写,本书的研究工作得到了黄卫东博士、杨强文博士和龚国稳高级工程师的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2008 年 1 月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 卫星星座	(1)
1.2 卫星星座系统概述	(3)
1.3 卫星星座的关键问题	(11)
参考文献	(23)
第二章 星座构型	(30)
2.1 星座轨道分析	(30)
2.2 典型星座构型及其描述模型	(39)
2.3 Walker 星座的地面轨迹	(49)
2.4 星座构型状态描述	(52)
2.5 星座构型与运行维持	(54)
2.6 星座构型与星间链路	(60)
参考文献	(67)
第三章 星座构型一体化优化设计方法	(69)
3.1 星座构型一体化设计	(69)
3.2 星座设计的性能测度及其一般统计方法	(70)
3.3 星座设计优化模型	(73)
3.4 多目标进化算法与约束处理	(77)
3.5 基于序列约束边界法的约束处理方法	(79)
3.6 动态分段优化控制	(83)
3.7 星座多目标、多约束化优化方法	(85)
3.8 优化设计实例	(86)
参考文献	(93)
第四章 卫星星座系统优化设计方法	(94)
4.1 星座系统优化设计	(94)
4.2 星座系统设计和成本模型	(95)
4.3 系统可靠性模型	(105)
4.4 系统性能分析模型	(109)

4.5	系统分解与协调	(111)
4.6	基于协作优化方法的星座系统优化设计	(113)
4.7	优化实现与结果	(117)
	参考文献	(121)
第五章	星座构型设计的参数偏置摄动补偿方法	(124)
5.1	参数偏置摄动补偿	(124)
5.2	卫星轨道摄动	(124)
5.3	摄动影响下星座构型稳定性	(131)
5.4	摄动影响下星座性能变化	(135)
5.5	提高星座构型稳定性的参数偏置摄动补偿方法	(136)
5.6	设计实例与分析	(138)
	参考文献	(144)
第六章	星座构型保持策略与方法	(146)
6.1	星座构型控制	(146)
6.2	星座构型最大容许漂移量	(147)
6.3	星座构型保持控制	(155)
6.4	区域覆盖星座构型保持控制	(162)
	参考文献	(167)
第七章	星座构型重构控制方法	(168)
7.1	星座构型重构	(168)
7.2	卫星失效模式及性能影响分析	(169)
7.3	星座重构控制	(171)
7.4	星座重构控制优化设计	(173)
7.5	设计实例与分析	(177)
	参考文献	(179)
第八章	星座空间备份策略与设计	(180)
8.1	星座空间备份	(180)
8.2	星座空间备份策略设计性能模型	(184)
8.3	星座空间备份策略优化设计	(190)
	参考文献	(193)
第九章	星座分阶段部署策略与设计	(195)
9.1	分阶段部署星座设计需求与约束	(195)
9.2	设计模型	(200)

9.3	基于多目标进化算法的星座优化设计	(202)
9.4	设计实例和分析	(203)
	参考文献	(212)
第十章	基于星间观测的星座自主导航系统	(213)
10.1	基于星间观测的星座整网定轨的数学分析	(213)
10.2	星座自主导航系统构成	(226)
10.3	测量方案	(228)
10.4	时间同步	(239)
10.5	整网定位精度的影响因素	(240)
	参考文献	(244)
第十一章	基于星间观测的星座自主导航方法	(246)
11.1	基于星间观测自主定轨的基本原理	(246)
11.2	秩亏自由网的平差解法	(249)
11.3	星座的整网定轨模型	(252)
11.4	快速平差方法研究	(259)
11.5	仿真结果与分析	(267)
	参考文献	(271)
第十二章	抗差估计理论在星座自主导航中的应用	(272)
12.1	抗差估计基本概念	(272)
12.2	抗差最小二乘估计	(274)
12.3	几种星间测距网平差模型的抗差估计	(278)
12.4	星间测距网抗差方案设计	(281)
12.5	算例分析	(288)
	参考文献	(292)
第十三章	星间观测/星敏感器的组合导航方法	(294)
13.1	星光折射间接敏感地平导航原理	(294)
13.2	基于星间观测+星敏感器的导航滤波器设计	(300)
13.3	组合导航系统仿真	(304)
	参考文献	(312)
第十四章	基于 GPS 星历的星座自主导航仿真试验	(313)
14.1	精密轨道预推	(313)
14.2	观测数据模拟	(316)
14.3	导航系统仿真	(320)

参考文献	(329)
第十五章 区域导航星座优化设计与控制	(330)
15.1 区域导航星座设计的基本需求与约束	(330)
15.2 区域导航星座优化设计	(332)
15.3 区域导航星座扩充优化设计	(335)
15.4 星座构型稳定性和控制策略	(342)
参考文献	(347)
第十六章 天基多基地雷达系统分析与设计	(348)
16.1 天基多基地雷达系统概念	(349)
16.2 天基雷达覆盖模型	(350)
16.3 天基多基地雷达性能分析	(352)
16.4 多基地雷达星座设计	(365)
参考文献	(372)
第十七章 通信星座设计	(374)
17.1 椭圆轨道通信星座设计	(374)
17.2 考虑频率共享约束问题的通信星座设计	(384)
参考文献	(389)

第一章 绪 论

1957年10月,第一颗人造地球卫星发射升空,标志着人类进入空间新纪元的开始。由于特有的位置优势,半个世纪以来,卫星在经济、军事、科学等各个领域迅速得到广泛应用,发挥出举足轻重的作用。至今,已有30多个国家发射了8000多颗卫星,每天有2000多颗卫星在轨道上运行。近年来,军事大国开始考虑在空间部署武器,卫星又以一种新的方式进入空间,空间成为新的战略制高点。

纵观卫星技术几十年来的发展历程,虽然在不同时期不同的研究领域呈现出不同的特点,但是有两条主线始终贯穿其中。首先,从卫星技术发展的纵向来看,单颗卫星的性能不断提高。卫星平台技术有了长足的发展,有效载荷种类不断丰富,载荷技术和能力不断提高。其次,从卫星技术发展的横向来看,卫星之间的联系越来越密切。航天任务将不再由单一卫星来完成,多卫星合作已成为卫星应用的主流形式。对于很多应用,例如全球通信或导航,单个卫星难以圆满完成任务目标。完成这类任务的一种方法是在相同或不同轨道面上布置多颗卫星,这样就出现了一种新型的空间系统——卫星星座。

1.1 卫星星座

在卫星应用早期,主要通过单颗卫星来完成的任务。卫星是依靠地球万有引力提供向心力飞行的航天器,它始终以一定速度绕地球飞行,因此,除个别特殊的情况(如地球静止轨道卫星),卫星是不能够固定在地球某点的上空的,其覆盖区域总是随时间的变化而不断变化,而且这种变化规律严格受轨道高度和轨道倾角的制约。因此,在大多数情况下,单靠一颗卫星难以实现全球或特定区域的不间断通信、侦察、探测目的。解决问题的一个最直接的方法就是利用多颗卫星协同工作,共同完成同一任务,这些卫星的运动在时间和空间上遵循一定的规律,使得对目标区域的覆盖能够实现补充和衔接,保证目标区域能够以任务要求的时间间隔或覆盖重数被卫星覆盖。

卫星星座(简称“星座”)是指由多颗卫星组成,卫星轨道形成稳定的空间几何构型,卫星之间保持固定的时空关系,用于完成特定航天任务的卫星系统。卫星星座构成的航天系统称为卫星星座系统。星座构型是对星座中卫星的空间分布、轨道类型以及卫星间相互关系的描述。从概念上讲,卫星星座属于一种分布式卫星系统,通过把多颗卫星散布到轨道上,以实现整个系统功能的扩展。而近年来引起各国航

天界极大关注的“分布式卫星系统”，却是特指由微小卫星构成，且卫星间相对距离较近的一类航天系统。这类系统区别于卫星星座的最大特点，就是各星之间存在紧密的信息互联和协同控制。从轨道动力学角度，分布式卫星系统表现为多颗卫星的编队飞行，它和通常所指的卫星星座有某些共性，但也存在明显区别。编队飞行要求星间关系满足一定条件，从而形成封闭的相对运动轨迹，利用编队卫星构成的特定几何形状实现任务目标^[1]。编队飞行的主要目的是构成长基线的“虚拟卫星”，这同广泛应用于导航、通信和预警领域的卫星星座概念有所不同，因此，一般不将卫星编队飞行相关技术包括在卫星星座理论与设计的内容之内。

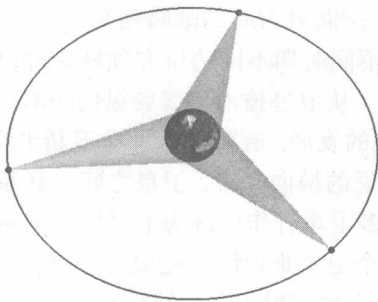


图 1-1 同步轨道卫星星座

最早提出星座概念的是 Arthur C. Clarke，他于 1945 年在《Wireless World》上发表的一篇名为“Extra-Terrestrial Relays?”的文章中指出：在静止轨道上等间隔放置 3 颗卫星，可以实现全球除两极以外覆盖，因此地球静止轨道也被称为 Clarke 轨道。由三颗静止轨道卫星构成的星座如图 1-1 所示。但是，地球静止轨道卫星星座不能够完全实现全球覆盖，同时，静止轨道站位资源比较紧张，因此，更多的应用是将卫星星座部署在低于地球静止轨道高度的广袤空间。轨道高度介于 500~36000km 之

间，轨道倾角介于 $0\sim 180^\circ$ 的圆轨道星座统称为“倾斜圆轨道星座”，是目前研究和应用最多的星座。

可见，最初提出星座是想通过多颗卫星的组合，提供更宽广的时空覆盖范围，实际上是单颗卫星的覆盖能力扩展。早期星座理论也集中在星座构型和覆盖几何的研究上。而航天技术的进步以及星座系统应用的不断深入，极大地推动了星座技术的发展。相对于单颗卫星而言，星座不仅是覆盖性能的扩展，同时通过加强卫星间的协同关系以获得星座功能的突破性提升、信息获取质量的大幅度增强以及任务模式的多样化，星座的工作能力远远超出单个卫星性能的简单累加。随着星座技术的不断发展与完善，多层面的协同成为星座发展的必然趋势，这种协同将使卫星星座的功能越来越强大，发挥的作用也越来越大。

从星座中卫星的空间分布来看，可将星座分为全球分布星座和局部分布星座。全球分布星座中的卫星散布在以地心为中心的球面上，相对地心有一定的对称性。而局部分布星座中的卫星形成一个卫星簇围绕地球运动，完成一次任务需要所有卫星的合作，如美国的子午仪(Transit)导航星座。

从轨道构型的角度，可以将星座分为同构星座和异构星座。所有卫星的轨道具有相同半长轴、偏心率以及近地点角距，相对于参考平面有相同的倾角，每个轨道

平面中有相同数量且均匀分布的卫星,这样的星座称为同构星座,而由多种轨道卫星组成的星座称为异构星座,通常也称为混合星座。如常见的 Walker 星座就属于同构星座,而美国的 Ellipso 通信星座就属于异构星座,它包含椭圆轨道和赤道轨道两类轨道。

从星座的应用及其功能的角度的,可以将星座大致分为单一功能星座和混合功能星座。面向某种具体应用、装载相同类型载荷的星座称为单一功能星座,如通信星座、导航星座等。星座中卫星装载不同的载荷,面向同一航天任务,称为混合功能星座,如由 SAR(Synthetic Aperture Radar)卫星、电子侦察卫星、可见光成像卫星组成的对地观测卫星星座。

从覆盖的角度,星座的分类方式更多。根据覆盖区域的不同星座可分为全球覆盖、纬度带覆盖和区域覆盖星座,严格意义上的全球覆盖星座指的是覆盖范围为经度 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$,纬度 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的星座,而通常情况下将覆盖范围经度 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$,纬度 $-\lambda\sim \lambda(\lambda>60^{\circ}$,即地球人口主要分布区)的星座也称为全球覆盖星座。纬度带覆盖星座指的是覆盖范围为经度 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$,纬度 $\lambda_1\sim \lambda_2\cup \dots \cup \lambda_{n-1}\sim \lambda_n$ 的星座。因此,覆盖范围经度 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$,纬度 $-\lambda\sim \lambda(\lambda>60^{\circ})$ 的星座也是一类纬度带覆盖星座。区域覆盖星座指的是对地球表面上任意给定区域实现覆盖的星座,这里的任意区域一般指的是经度范围小于 360° 的区域。而事实上,除特殊位置的卫星如同步轨道卫星,由于卫星运动所固有的全球性,区域覆盖星座通常都具有全球覆盖能力,这在星座设计的时候是值得注意的重要问题。按照覆盖重数的不同,星座可分为单重覆盖和多重覆盖星座。按照时间分辨率的不同可以分为连续覆盖星座和间歇覆盖星座,连续覆盖星座指的是对目标区域内的任意地点实现不间断覆盖的星座,而间歇覆盖星座则是以一定的时间间隔对目标区域实现覆盖的星座。如 GPS 导航星座为全球连续多重覆盖星座,GlobalStar 通信星座为全球连续单重覆盖星座,而美国曾提出的全球监视雷达星座 Discover II 是全球间歇覆盖星座(覆盖范围 $S65^{\circ}\sim N65^{\circ}$)。

按照上面的分类,由三颗 IGSO(Inclined Geosynchronous Orbit, 倾斜同步轨道)卫星构成的星下点轨迹为重复“8”字形的星座就是一个全球分布、区域覆盖星座。而美国的 Transit 星座则是一个局部分布、全球覆盖星座。

1.2 卫星星座系统概述

星座的概念在 1945 年被提出后,由于其巨大的技术优势和广阔的应用前景,引起了广泛的重视。但是,由于星座卫星数目众多,成本高昂,建设周期长,运行管理复杂,只有少数国家具备这样的经济和技术实力发展卫星星座,因此,在 20 世纪相对于卫星技术的突飞猛进发展而言,作为大系统的星座,其发展较为平稳。

由于星座在导航和通信方面具有其他手段不可替代的优势,因此,星座系统主要集中在导航和通信领域,目前美国拥有的星座系统最多。这些星座相继投入使用,向人们展示了巨大的社会、经济和军事效益,也极大地推动了星座技术的发展。近年来,随着技术的飞速发展,空间的战略地位日益突出,各国都积极地把其先进基础设施转向空间,星座也呈现出迅猛发展的态势。星座获取、传递信息的连续性和时效性尤其使其在军事中具有无可替代的优势。从支持语音通信的移动通信系统到宽带多媒体移动网络系统,从提供情报支援作战的信息系统到直接参与作战的武器系统,一个个星座计划相继提出,载荷类型涵盖了目前所有的卫星载荷类型,轨道类型涵盖了 LEO, MEO, HEO, IGSO, GEO 等,无不在展示星座巨大的潜力和应用前景。可以肯定地说,卫星以星座的形式组网运行是必然的发展趋势。可以预见,未来的星座以及由诸多星座联合构成的空间卫星网络,将对人类的活动产生无可比拟的影响。

第一个中低轨星座的雏形是美国的“子午仪”(Transit)卫星导航系统。1958年12月,以霍普金斯大学为首的“子午仪”卫星导航小组成立,1960年4月第一颗“子午仪”卫星发射成功,1964年7月4颗“子午仪”卫星组网成功,形成实用导航系统,并正式交付美国海军使用。“子午仪”星座由6颗卫星组成,其中5颗为工作星,1颗为备份星,卫星运行在轨道倾角 $89^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的极轨道上,轨道高度约1075km,卫星以7.3km/s的速度绕地球旋转,运行周期约107min。“子午仪”星座虽然由多颗卫星组成,而实际上,由于一次导航定位需要至少4颗卫星才能够实现,因此,星座中的多颗卫星是同时完成一次任务的,在时间和空间上并没有互补的作用,相当于GPS等全球导航星座的一个功能单元。海湾战争开始时,在轨有12颗“子午仪”卫星(含工作星和备份星)。海湾战争结束后,“子午仪”系统退出现役,转为民用。

美国的GPS(Global Position System)导航系统是第一个真正意义上的全球星座,

也是目前世界上唯一可用的全球卫星导航系统,在交通运输、基础测绘、工程勘测、资源调查、地震监测、气象探测和海洋勘测等领域得到了广泛的应用。该系统从1973年开始研制,1993年12月开始提供服务,1995年7月达到满站位运行。GPS星座初始设计为24颗卫星分布在3个轨道面上的空间构型,轨道高度为1/2恒星日的回归轨道,轨道倾角为 55° 。后来由于经费、风险等原因,在实际部署时,改成了由18颗工作卫星均匀地分布在6个轨道面上的Walker- δ 构型,同时还部署了3颗备

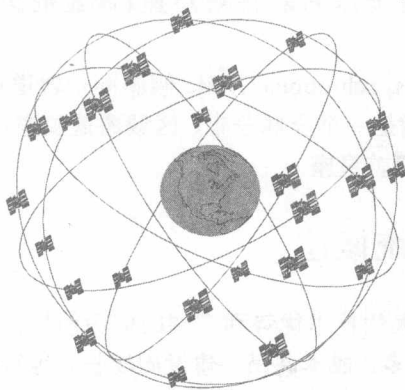


图 1-2 GPS 星座示意图

份星。由于系统的成功,迅速扩充到 21 颗工作卫星和 3 颗备份卫星。目前提供导航服务的 GPS 的构型已经变成了 24 颗工作卫星和 3~5 颗备份卫星的构型。GPS 星座卫星在轨道内不是均匀间隔的,而且轨道面间的相位差也不是严格按照 Walker 星座的定义选取的,因此,可以认为 GPS 是一个经定制的 Walker 星座。工作星的分布如图 1-2 所示。GPS 是第一个真正意义上的全球星座,它保证了全球任何地方的用户在任意时刻能同时可见 4 颗以上的卫星进行导航定位。GPS 的卫星已经从第一颗 Block I、经过第一代 Block II、第二代 Block IIA 发展到第三代 Block IIR, GPS 卫星的能力也逐步得到了很大提高^[2]。由于 Block IIR 具有星间测距和在轨处理导航数据的能力, GPS 星座将逐渐具有自主生存能力^[3]。同时,美国正在开始考虑设计新的星座构型,通过增加 GPS 卫星数目以更加有效地利用目前的在轨卫星,并且提出了 6 轨道面和 3 轨道面的两种方案^[4]。

俄罗斯的 Glonass(Global Navigation System)是一个和 GPS 对等的系统。该系统从 20 世纪 70 年代开始研制,到 1996 年 1 月完成了 24 颗工作卫星和 1 颗备份卫星的部署^[5]。随后许多早期发射的卫星很快失效,整个星座迅速退化。从 1996 年到 2001 年,俄罗斯仅发射了两组卫星,每组 3 颗,这对于维持整个星座正常运行是不够的。到 2003 年 11 月,只剩 8 颗在轨工作卫星,已经不能独立组网。Glonass 采用的是 24/3/1 的 Walker- δ 星座,卫星轨道为 8 天 17 圈的回归轨道,轨道高度 19129km,倾角 64.8° 。Glonass 星座的一个重要特点是所有卫星重复相同星下点轨迹,这给地面测控和管理带来了很大的便利。受制于俄罗斯的经济状况,Glonass 发展一直不顺利。最近的一次发射是 2007 年 12 月 25 日,将三颗 Glonass-M 卫星送入轨道,使得在轨工作的卫星数目增加到了 18 颗。

2001 年 4 月,欧盟启动了 Galileo 卫星导航系统计划,确定用 30 颗卫星提供全球导航服务。Galileo 星座采用 27 颗工作卫星和 3 颗备份卫星的方案,星座构型为 27/3/1 的 Walker- δ 星座构型,卫星轨道为 10/17 恒星日的回归轨道,轨道倾角为 56° 。Galileo 的目标是能提供比 GPS 和 Glonass 更高的服务质量^[6]。2005 年 12 月 28 日,首颗试验卫星“GIOVE-A”发射升空,标志着“伽利略”计划已进入实质性实施阶段^[7]。按照计划,2008 年还将发射 4 颗卫星,完成试验阶段的工作。30 颗“Galileo”系统卫星全部部署完毕之后,欧洲将有望结束依赖美国的 GPS 全球卫星定位系统的历史。目前有中国、印度、以色列、摩洛哥、沙特阿拉伯和乌克兰 6 个非欧盟国家已参与到该计划中。

鉴于卫星导航系统对一个国家的重大战略意义,我国开始发展具有自主知识产权的卫星导航定位系统。2000 年以来,我国已成功发射了 4 颗“北斗一号试验卫星”,建成了“北斗一号”区域卫星导航系统,该系统利用两颗地球静止轨道卫星为中国及其周边地区用户提供快速定位、简短通信和精密授时服务。目前“北斗一号”导航系统已成功部署了 4 颗“北斗一号”导航试验卫星。由于“北斗一号”采

用主动式导航定位原理,其服务用户数量有限,安全性和保密性也不是很好,也无法满足那些需要精密定位或高动态定位的用户要求,因此需要建设采用无源被动定位原理的提供全球服务的北斗卫星导航系统。2007年4月14日,中国第一颗无源定位北斗导航卫星(Compass-M1)的发射成功标志着我国北斗导航系统进入了新的发展建设阶段。

20世纪80年代开始掀起的小卫星技术热潮对星座的发展起了巨大的推动作用。早期卫星质量大,研制周期长,要完成一个星座的部署很困难。在卫星运行寿命短和可靠性差的情况下,没有等到星座部署完成,早期发射的卫星就已经不能工作了。在当时的技术和经济条件下,小卫星提供了一个较好的解决思路,与此同时世界通信市场不断扩大,这两方面因素促进了移动通信星座发展。

在20世纪90年代,中低轨通信星座开始盛行,最多时有十几个卫星通信星座计划。这些星座通常被分为三类。a) 大低(中)轨(Big LEO)卫星移动电话系统; b) 小低(中)轨(Little LEO)卫星移动数据传输系统; c) 宽带多媒体通信系统(Ka波段)。根据美国联邦通信委员会的决定,小LEO系统是非语音非静止轨道卫星,在轨道高度较宽的范围内提供低速业务;而大LEO系统要提供语音、传真、数据和寻呼业务,寻呼包括在低速业务内^[8]。

然而通信星座发展并不顺利,主要原因在市场竞争和经济因素。因为目前通信密集地区是城市,而城市地面蜂窝通信费用很低,卫星通信费用高。由于竞争不过现有的通信手段,当时名震一时的“铱”系统(Iridium)运营商最终宣布破产。目前Orbcomm和“全球星”系统(GlobalStar)运营正常,Orbcomm是低成本的数据通信和定位系统,而“全球星”主要是满足国防、边远、沙漠地区通信的需要,填补了地面通信网的空白。随着技术的发展以及卫星移动通信成本的下降,移动通信星座还是有广泛的应用前景。

Orbcomm是一个在全球范围内提供双向、窄带的数据传送、数据通信以及定位业务的卫星通信系统。Orbcomm设计为47颗卫星(包括6颗备用卫星)分布在7个轨道面的全球覆盖的星座系统,这7个轨道面命名为A, B, C, D, E, F, G。其中, A~D轨道倾角为 45° ,高度800km; E为赤道轨道,高度975km; F, G轨道倾角分别为 70° 及 108° ,高度820km。Orbcomm从1995年开始发射试验卫星,1998年底开始提供全球服务。目前在轨服务的卫星共有29颗, A, B平面各有8颗卫星, C, D轨道各有6颗卫星, G轨道1颗卫星。Orbcomm的每颗卫星不足50kg,是典型的低成本微小卫星。目前该系统已经在交通运输、油气田、水利、环保、渔船以及消防报警等方面发挥重要作用^[9]。

“铱”系统是美国摩托罗拉公司于1987年提出的一种利用低轨道星座实现全球个人卫星移动通信的系统,它与现有的通信网相结合,可以实现全球数字化个人通信。“铱”系统区别于其他卫星移动通信系统的特点之一是卫星具有星间通信链

路,能够不依赖地面转接为地球上任意位置的终端提供连接,因而系统的性能极为先进、复杂,投资费用较高。星座的构型为玫瑰星座,卫星均匀部署在南北方向 677km 高的 6 条极轨近圆轨道上,轨道倾角为 86.4° ,如图 1-3 所示。每颗卫星载有 3 个 16 波束相控阵天线,其投射的多波束在地球表面形成 48 个蜂窝区。每颗卫星拥有 4 条 Ka 频段的星间通信链路,两条用于建立同轨道面前后方向卫星的星间链路,星间距离 4021~4042km;两条用于建立相邻轨道面间卫星的通信链路(仅适用于纬度 68° 以下地域),星间距离 2700~4400km。异轨道面间链路的的天线可根据加载到卫星上的星历信息进行指向调整,波束宽度足以适用纬度控制和卫星位置保持的容差。卫星在轨重量 320kg,工作寿命 5~8 年。



图 1-3 “铱”系统示意图

“全球星”系统是美国 Loral 和 Qualcomm 公司发起的,是目前唯一正式商业运行的语音移动通信系统。卫星系统由 48 颗工作卫星和 12 颗备用卫星组成。最近的一次发射是在 2007 年 10 月 21 日,由俄罗斯的运载火箭将四颗备份卫星送入轨道。卫星重约 450kg,预定寿命为 7.5 年。分布在 8 个倾角为 52° 的圆轨道上,轨道高度 1414km,每个轨道分布 6 颗工作卫星和 1~2 颗备用卫星,星座的相位因子为 1。系统主要覆盖南北纬 70° 以内地区。“全球星”系统的每个卫星利用 16 个点波束天线将辐射区划分为 16 个小区以与地面的用户和网关相互收发信息^[10]。考虑到信息传输的多样性和链路余量问题,“全球星”在主要的商业服务区(北纬 $25^\circ \sim 49^\circ$)满足任何时刻至少两重覆盖的要求,而其他地区则只要求保证一重覆盖^[11],“全球星”系统的地面覆盖如图 1-4 所示。“全球星”系统的卫星设置弯管式(Bent Pipe)转发器,通过地面建立不在同一卫星覆盖区内的用户的连接,因此,需要建立较多的网关地球站。

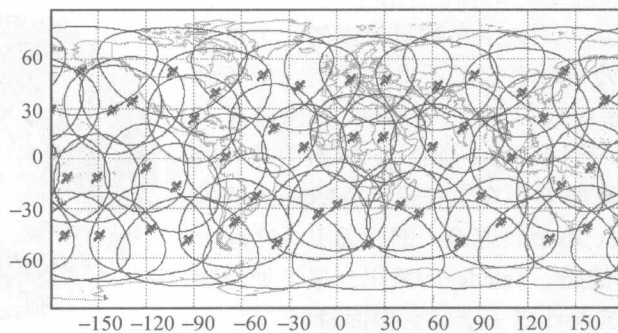


图 1-4 GlobalStar 地面覆盖示意图

除上述已经投入运营的卫星通信系统外，同时期的还有 ICO, Ellipso 等卫星通信系统计划。ICO 全球通信系统由高度为 10390km 的中轨大型卫星组成，共有 12 颗卫星，布置于 2 个轨道面，每个轨道面 5 颗工作星，1 颗备份星^[12]。由于受“铱”系统的影响，投资者缺乏信心，1999 年也曾宣布破产重组。

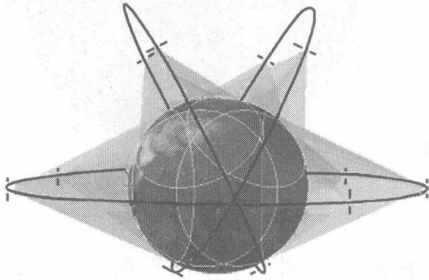


图 1-5 Ellipso 星座示意图

美国的移动通信控股公司的 Ellipso 卫星移动通信系统是一种独特的混合轨道星座，它由两个规则的子星座即 Borealis 和 Concordia 组成，用 17 颗卫星实现人口主要分布区域(北半球和南半球的中低纬地区)的覆盖，星座结构如图 1-5 所示。比 Iridium 星座和 GlobalStar 星座的卫星数量少得多。在该星座中有 10 颗卫星部署在两条轨道倾角为 116.6° 的椭圆轨道上(Borealis)，近地点高度 520km，远地点高度 7846km，轨道

周期为 3h，偏心率为 0.35，用以覆盖北半球中高纬度地带；另有 7 颗卫星部署在轨道高度为 8063km 赤道圆轨道上(Concordia)，用以覆盖中低纬度地带^[13]。

随着数字技术的进步以及人们对高质量的电文、语音、数据和视频通信业务需求的增长，美国许多通信经营商纷纷投向宽带多媒体卫星系统，已有多家公司获得了 FCC(Federal Communications Commission, 美国通信委员会)的许可证。它们都将利用 Ka 波段(20~30GHz)提供宽带、大容量、多媒体的卫星通信业务，典型的静止轨道系统如 Spaceway, Astrolink 等，中低轨系统有 Skybridge, Teledesic 等。

Skybridge 星座由 80 颗低地球圆轨道卫星组成，采用 Ka 波段支持高速数据、因特网接入及宽带多媒体技术。Skybridge 星座在设计上有其特殊之处，为了避免与同步轨道或其他高轨卫星的频率冲突，采用了复合 Walker 星座的构型，以“星对”为单元构成整个星座，这样当任意一颗卫星与其他卫星发生冲突时，采用另外一颗处于安全距离的卫星来替代工作。

Teledesic 是迄今为止卫星数目最多的一个星座计划，在计划刚公布时引起了不小的反响。星座最初计划由 840 颗星组成，如图 1-6 所示。后来改成了 288 颗卫星，分布于 12 平面，每个面 24 颗卫星，后又减至 120 颗卫星加 6 颗在轨备份。Teledesic 的星地链路为 Ka 波段，每个轨道面上的相邻卫星之间建有 60GHz 的星际链路，Teledesic 采用全星上处理和全星上交换，系统设计成一个“空中因特网”。

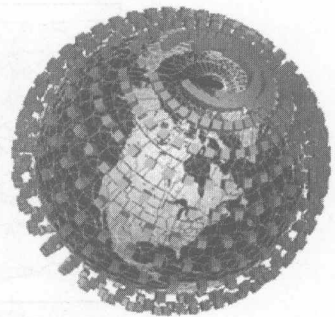


图 1-6 最初的 Teledesic 星座

随着军用通信、侦察、预警、监视系统向空间