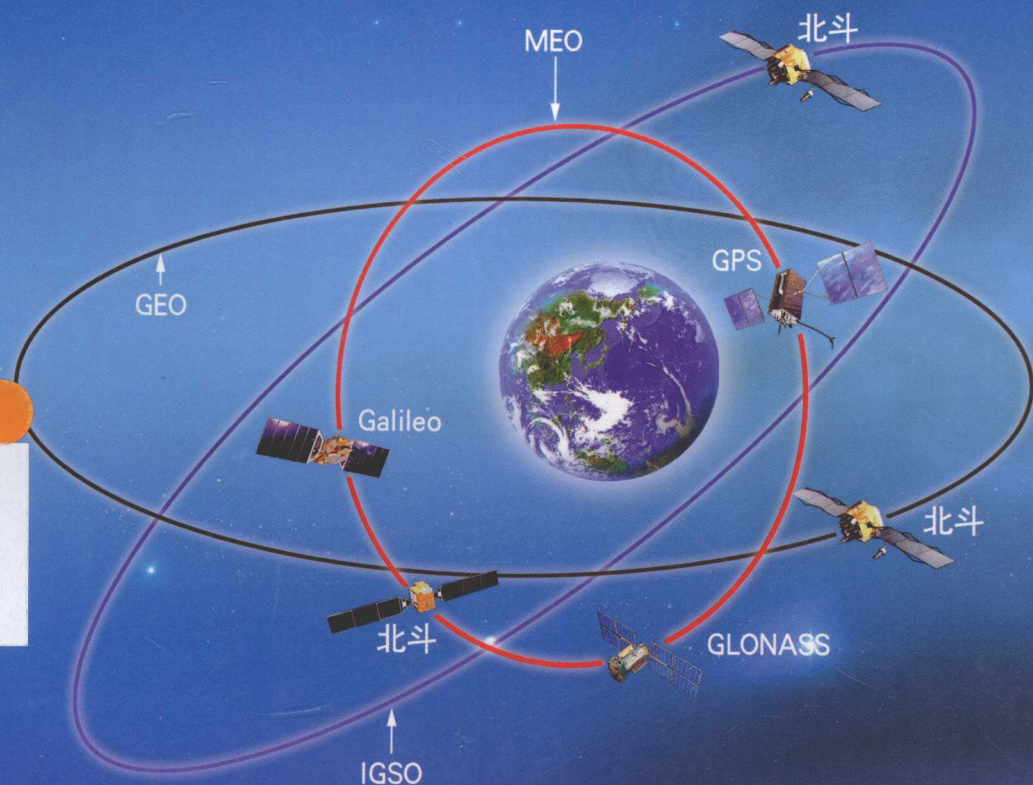




# 全球导航卫星系统及其应用

Global Navigation Satellite System and Its Applications

刘基余 编著



测绘出版社

# 全球导航卫星系统及其应用

Global Navigation Satellite System and Its Applications

刘基余 编著

测绘出版社

© 刘基余 2015

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

### 内容简介

本书共有 5 章:第 1 章 GNSS 全球导航卫星系统的现况与发展,主要论述了 GPS、GLONASS、北斗、Galileo、WAAS、EGNOS、QZSS、IRNSS、DORIS、PRARE 的现况与发展;第 2 章导航卫星及其特性,简要地论述了导航卫星的正常轨道和摄动轨道,较详细地论述了当代 GNSS 卫星工作星座,以及 GNSS 导航电文及其更新方法;第 3 章 GNSS 导航信号,对 GNSS 信号共用载波频率、所用伪随机噪声码特性、GNSS 卫星所用的测距码多样性等分别予以了较深入的论述;第 4 章 GNSS 信号接收机,针对其应用广泛的特点,较深入地解读了接收机接收、跟踪、变换和测量 GNSS 信号的主要部件及其发展;第 5 章 GNSS 开创平民百姓出行的便捷之途,主要论述伪距和载波相位测量定位、定时、测速的工作原理,卫星导航定位主要误差,以及中等动态的载波相位测量定位的工程实用案例。

本书的特点是:基于详解北斗好,四大系统兼顾妙;深入浅出讲原理,启迪深思永不老。可作为航空、航天、海洋、交通、航道、地质、石油、水利、农业、地理信息和测绘等行业初学者的教学参考书,GNSS 相关专业研究生的攻研参考书,GNSS 工程技术人员的开拓参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

全球导航卫星系统及其应用 / 刘基余编著. — 北京:测绘出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-5030-3590-6

I. ①全… II. ①刘… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 070223 号

责任编辑	赵福生	封面设计	李伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻迅
出版发行	测绘出版社			电 话	010-83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010-68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京建筑工业印刷厂			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	28			字 数	548 千字		
版 次	2015 年 5 月第 1 版			印 次	2015 年 5 月第 1 次印刷		
印 数	0001-3000			定 价	59.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3590-6/P·773

审 图 号 GS(2015)895 号

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

# 前 言

全球导航卫星系统,是英文名“Global Navigation Satellite System”(缩写为GNSS)的译名。笔者认为,不能够将它译为“全球卫星导航系统”,而应该叫作“全球导航卫星系统”。因为,卫星是在天空中环绕地球而运行的,其“全球性”是不言而喻的,而“全球导航”是相对于经典的陆基区域性导航而言,以此体现卫星导航的优越性。为便于明义,笔者建议采用“GNSS全球导航卫星系统”之称,它是所有在轨工作的卫星导航系统的总称。目前,主要包括GPS卫星全球定位系统、GLONASS全球导航卫星系统、北斗卫星导航试验系统、北斗卫星导航系统(区域性覆盖星座)、Galileo全球导航卫星系统、QZSS准天顶卫星系统、IRNSS印度区域导航卫星系统、WAAS广域增强系统、EGNOS欧洲静地卫星导航重叠系统、DORIS星载多普勒无线电定轨定位系统、PRARE精确距离及其变率测量系统、GAGAN GPS静地卫星增强系统。从现行的GNSS发展计划可知,2020年将有140余颗导航卫星在轨运行,卫星导航产业将成为继供水、供电、供气和电信之后的第五大公用事业。

纵观应用,GNSS卫星导航定位技术能够准确地回答:我在哪里?你离我有多远?现在为何时?我走得有多快?是否倾斜?因此,1978年2月22日第一颗GPS试验卫星入轨运行以来,且不论GPS在航空、航天、航海和陆地测量中广泛应用,而且入户伴人随行的应用也有:戴在人们头上的GPS眼镜、穿在人们脚上的GPS鞋、挂在人们腰带上的GPS跟踪器和握在人们手中的GPS照相机等。我国自主研发的北斗卫星导航系统于2012年12月27日开始区域性服务以来,人们期待了解它的原理及其应用竞争力的愿望日渐强烈,本书力图为广大GNSS爱好者提供一份相关的口味适宜的精神食量。

2011年初春,《数字通信世界》编辑部主任赵法彬同志邀请笔者为该期刊读者做GNSS讲座。此后,笔者一直在该期刊上发表GNSS的系列讲座文章。为此,笔者确定的写作原则是:立足科学性,严谨论述难点、重点;注重GNSS新近发展,多渠道采集相关资料;兼顾多行业读者需求,写作跨学科、易读易懂的讲座文章。三年多来,得到专家和读者的好评。本书有关章节采用了这些讲座文章,并做了适当增修。此外,以笔者独著的《GPS卫星导航定位原理与方法》一书(科学出版社于2008年出版发行的第二版)中部分章节为素材,构成了本书相关章节,进而依据所采集的新近资料,予以适当增修。因此,本书是一部立论新颖、注重新发展、适合多行业读者需求的GNSS著作,为多学科读者深入解读北斗卫星导航系统打开了

方便之门。

值此图书出版之际,感谢《数字通信世界》编辑部主任赵法彬同志为笔者提供了一个深化 GNSS 技术研究的坚实平台!

本书涉及伪噪声编码技术、卫星轨道理论、微波与天线、锁相环路技术、数字通信技术、微电子技术、计算机技术、现代数据处理技术和大地测量技术等诸多学科。笔者虽然始于 20 世纪 80 年代中期涉足该领域的教学与科研,但是仍感水平有限,疏漏谬误之处诚请读者不吝斧正!(请发电子邮件至:00200012@whu.edu.cn)

编著者

2014 年 10 月于武汉大学

# 目 录

第 1 章 GNSS 全球导航卫星系统的现况与发展 .....	1
§ 1.1 第一代全球导航卫星系统的贡献与不足 .....	1
§ 1.2 GPS 卫星全球定位系统及其新贡献 .....	8
§ 1.3 GLONASS 全球导航卫星系统及其得失点 .....	21
§ 1.4 北斗卫星导航系统及其特性 .....	37
§ 1.5 Galileo 全球导航卫星系统及其创新点 .....	54
§ 1.6 GPS 引领区域卫星导航系统建设热 .....	67
第 2 章 导航卫星及其特性 .....	80
§ 2.1 导航卫星的正常轨道及其描述 .....	80
§ 2.2 导航卫星的摄动轨道及其描述 .....	93
§ 2.3 GPS 卫星工作星座 .....	106
§ 2.4 卫星导航电文是 GNSS 的导航灵魂 .....	117
§ 2.5 GPS 卫星的导航电文 .....	124
§ 2.6 卫星导航电文的地面控制更新 .....	135
§ 2.7 卫星导航电文的在轨自主更新 .....	144
§ 2.8 卫星导航电文的编码纠错法 .....	153
第 3 章 GNSS 导航信号 .....	163
§ 3.1 BOC 调制打通共用载频的坦途 .....	163
§ 3.2 伪噪声码承载卫星导航电文的潜行器 .....	174
§ 3.3 测距码是卫星导航的顶梁柱 .....	187
§ 3.4 GLONASS 信号及其导航电文 .....	199
§ 3.5 北斗导航信号及其导航电文 .....	215
§ 3.6 卫星激光测距用于 GNSS 星历精化的现况与发展 .....	231
第 4 章 GNSS 信号接收机 .....	249
§ 4.1 GNSS 信号接收机的基本结构 .....	249
§ 4.2 微带天线 .....	257
§ 4.3 GPS 信号接收机的工作原理 .....	263

§ 4.4	GPS 观测量及其测量 .....	270
§ 4.5	GNSS 信号接收机的优异点 .....	275
§ 4.6	GPS 信号接收机的新近发展及其启迪 .....	289
§ 4.7	GNSS 信号接收机的软件化 .....	300
§ 4.8	GNSS 信号接收机的基本性能检验 .....	306
<b>第 5 章</b>	<b>GNSS 开创平民百姓出行的便捷之途 .....</b>	<b>317</b>
§ 5.1	GNSS 伪距单点定位 .....	317
§ 5.2	GNSS 伪距差分定位 .....	325
§ 5.3	GPS 伪距用于载体速度测量 .....	334
§ 5.4	GPS 伪距测量在定时中的应用 .....	341
§ 5.5	GNSS 载波相位测量 .....	352
§ 5.6	GNSS 载波相位测量的单点定位问题 .....	361
§ 5.7	GNSS 载波相位测量的 DGNSS 模型 .....	364
§ 5.8	GNSS 动态载波相位测量的工程实施 .....	371
§ 5.9	GNSS 大地坐标系的现况与应用问题 .....	385
§ 5.10	GNSS 卫星导航定位的精度、误差与偏差 .....	403
§ 5.11	GNSS 卫星导航定位的主要误差 .....	408
§ 5.12	GPS 现代化及其影响 .....	420
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>438</b>

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>The Current Status and Development of Global Navigation Satellite System</b>	1
§ 1.1	The Contribution and Inadequate of the First Generation Global Navigation Satellite Systems	1
§ 1.2	GPS Satellite Global Positioning System and Its New Contribution	8
§ 1.3	The Success and Failure of Glonass Global Navigation Satellite System	21
§ 1.4	BeiDou Navigation Satellite System and Its Characteristics	37
§ 1.5	Galileo Global Navigation Satellite System and Its Innovation	54
§ 1.6	GPS Leading the Building Heat for Regional Satellite Navigation Systems	67
<b>Chapter 2</b>	<b>The Navigation Satellites and Their Characteristics</b>	80
§ 2.1	The Normal Orbits of Navigation Satellites and Their Description	80
§ 2.2	The Perturbed Orbits of Navigation Satellites and Their Description	93
§ 2.3	GPS Satellite Operational Constellation	106
§ 2.4	Satellite Navigation Message Being GNSS Navigation Soul	117
§ 2.5	GPS Satellite Navigation Message	124
§ 2.6	Updating Satellite Navigation Message by Means of the Ground Control Systems	135
§ 2.7	An Autonomous Update on the Orbits for Satellite Navigation Message	144
§ 2.8	Encoding Error Correcting Method on Satellite Navigation Message	153
<b>Chapter 3</b>	<b>GNSS Navigation Signals</b>	163
§ 3.1	The BOC Modulation to be Able to Share Easily the Carrier Frequencies	163
§ 3.2	The Pseudo-Random Noise Codes Carry out the Satellite Navigation Message	174
§ 3.3	The Ranging Code Being a Pillar of the Satellite Navigation	187



§ 3.4	GLONASS Signals and Their Navigation Message .....	199
§ 3.5	BeiDou Navigation Signals and Their Navigation Message .....	215
§ 3.6	The Current Status and Development on Refining GNSS Ephemeris by Means of Satellite Laser Ranging .....	231
<b>Chapter 4</b>	<b>GNSS Signal Receivers .....</b>	<b>249</b>
§ 4.1	Fundamental Structure of GNSS Signal Receivers .....	249
§ 4.2	Microstrip Antennas .....	257
§ 4.3	Operating Principle of GPS Signal Receivers .....	263
§ 4.4	GPS Observables and Their Measurements .....	270
§ 4.5	Strong Points and Differentiators of GNSS Signal Receivers .....	275
§ 4.6	Recent Development of GPS Signal Receivers and Its Inspiration .....	289
§ 4.7	Software-Based GNSS Signal Receivers .....	300
§ 4.8	An Inspection on Fundamental Performance of GNSS Signal Receivers .....	306
<b>Chapter 5</b>	<b>GNSS Creating the Convenient Way for the Civilian People Travels .....</b>	<b>317</b>
§ 5.1	GNSS Pseudo-Range Single-Point Positioning .....	317
§ 5.2	GNSS Pseudo-Range Differential Positioning .....	325
§ 5.3	The Carrier Speed Measurements Using GPS Pseudo-Range .....	334
§ 5.4	GPS Pseudo-Range Measurements in Timing Applications .....	341
§ 5.5	GNSS Carrier Phase Measurements .....	352
§ 5.6	Problems on Single-Point Positioning of GNSS Carrier Phase Measurements .....	361
§ 5.7	DGNSS Model of GNSS Carrier Phase Measurements .....	364
§ 5.8	GNSS Dynamic Carrier Phase Measurements in Engineering Applications .....	371
§ 5.9	The Current State and Application Problems of GNSS Geodetic Coordinate System .....	385
§ 5.10	Accuracy, Error and Bias of GNSS Satellite Navigation/Positioning .....	403
§ 5.11	The Main Errors of GNSS Satellite Navigation/Positioning .....	408
§ 5.12	GPS Modernization and Its Impact .....	420
<b>References</b>	<b>.....</b>	<b>438</b>

# 第 1 章 GNSS 全球导航卫星系统的现况与发展

GNSS 是 Global Navigation Satellite System 的缩写,为便于明义,笔者采用“GNSS 全球导航卫星系统”之称,它是所有在轨工作的卫星导航系统的总称。本章主要论述它的现况与发展。从现行的 GNSS 发展计划可知,2020 年将有 140 余颗导航卫星在轨运行,将使卫星导航产业成为供水、供电、供气和电信之后的第五大公用事业,其发展空间之大、市场之广,是我们难以想象的。

## § 1.1 第一代全球导航卫星系统的贡献与不足

第一代全球导航卫星系统主要有美国的子午卫星(TRANSIT)导航系统、原苏联的 CICADA 卫星导航系统、法国的 DORIS 星载多普勒无线电定轨定位系统和欧洲空间局(ESA)的 PRARE 精确距离及其变率测量系统。本节主要论述它们的贡献与不足。

### 1.1.1 子午卫星导航系统

1957 年 10 月 4 日,原苏联成功发射了世界上第一颗人造地球卫星,开创了空间技术造福人类的新时代。这颗苏联卫星入轨运行后不久,美国詹斯·霍普金斯(Johns Hopkins)大学应用物理实验室(APL)的韦芬巴赫(G. C. Weiffenbach)和基尔(W. H. Guier)等学者,在地面已知坐标点位上,用自行研制的测量设备捕获和跟踪到了苏联卫星发送的无线电信号,并测得了它的多普勒频移,进而用它解算出了苏联卫星的轨道参数。依据这项实验成果,该实验室的麦克雷(F. T. Meclure)等学者,设想了一个“反向观测方案”:若已知在轨卫星的轨道参数,地面上的观测者又测得该颗卫星发送信号的多普勒频移,则可测得观测者的点位坐标。这个设想,成为了第一代卫星导航系统的基本工作原理。它将导航卫星作为一种动态已知点,利用测量卫星信号的多普勒频移,实现海洋船舶等运动载体的导航定位。1958 年 12 月,美国詹斯·霍普金斯大学应用物理实验室在美国海军的资助下,开始用上述原理研制一种导航卫星系统,叫作美国海军导航卫星系统(nary navigation satellite system, NNSS)。因为这些导航卫星沿着地球子午圈的轨道运行(图 1.1.1),故又称之为子午卫星(TRANSIT)导航系统。1959 年 9 月,第一颗试验性子午卫星入轨运行,截至 1961 年 11 月,先后发射了 9 颗试验性子午卫星。经过几年的试验研究,解决了卫星导航的许多技术难题,而于 1963 年 12 月发射了

第一颗子午工作卫星。此后,陆续发射了工作卫星,形成了由 6 颗工作卫星构成的子午卫星星座(图 1.1.1)。在该星座信号的覆盖下,地球表面上任何一个观测者,至少每隔 2 h 便可观测到该星座中的一颗卫星。这些卫星的轨道绕过地球的南北两极上空,以使卫星星下点轨迹与地球子午圈一致;卫星轨道距离地面约为 1 070 km,每一个近圆形轨道上分布着一颗子午卫星;轨道椭圆的偏心率很小,近于圆形。子午卫星沿轨道运行的周期约为 107 min。每一颗子午卫星均用 400 MHz 和 150 MHz 的微波信号作为载波,向广大用户发送导航电文。子午卫星星座运行初期,导航电文是保密的。1967 年 7 月 29 日,美国政府宣布,解密子午卫星所发送的导航电文部分内容供民间使用。此后,利用子午卫星所发送的导航信号和导航电文进行导航定位测量,迅速地普及到世界上许多国家。



图 1.1.1 子午卫星导航星座

卫星多普勒导航技术自 20 世纪 60 年代问世以来,随着导航电文的部分解密,在许多国家获得了较广泛的应用。例如,22 家卫星多普勒接收机制造厂商的销售情况表明,1974 年仅销售了 860 台卫星多普勒接收机,1978 年却销售了 5 820 台,1980 年销售达 16 255 台,1982 年销售达 45 555 台。卫星多普勒接收机的销售量如此迅速递增,其主要原因是卫星多普勒导航定位精度随着子午卫星定轨误差的显著减小而提高,单机导航定位精度可达米级,多机联测定位精度可达亚米级。特别值得指出的是,子午卫星信号不仅能够用于海洋船舶等运动载体的精确导航定位,而且能够用于三维大地测量地心坐标的测定、陆地与海洋大地测量控制网的建立等许多大地测量作业。例如,素称千岛之国的印度尼西亚,用常规的大地测量技术无法建立全国统一的大地测量控制网,但借助卫星多普勒定位技术在“千岛”之上共测设了 200 多个多普勒控制点,建成了全国统一的大地测量控制网;再如,1984 年 12 月至 1985 年 2 月,在我国南极长城站上,用 MX-1502 型卫星多普勒接

收机(图 1.1.2)进行了卫星多普勒定位测量,共观测了 210 次子午卫星通过,从而精确地测定了设在南极乔治岛上长城站的地理位置:南纬  $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$ ,西经  $58^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$ ,高程为  $43.58 \pm 0.67$  m,南极长城站至北京的距离为 17 501 949.51 m。在狂风雪雾的南极乔治岛上,能够如此精确地测得点位坐标,这是卫星多普勒定位技术做出的历史贡献。

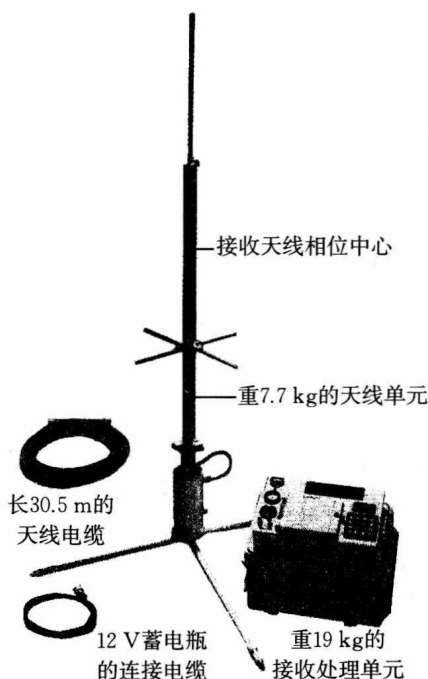


图 1.1.2 MX-1502 型卫星多普勒接收机

### 1.1.2 DORIS 星载多普勒无线电定轨定位系统

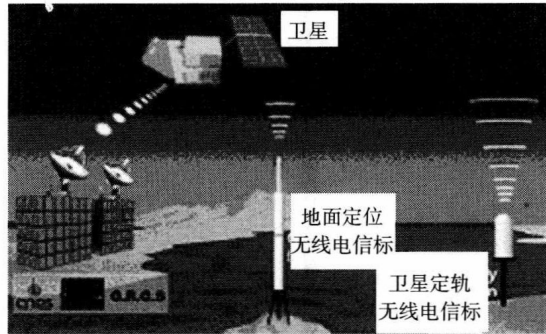
上述卫星多普勒导航定位原理,也被现代在轨作业的星载多普勒无线电定轨定位系统(Doppler orbitography and radio-positioning integrated by satellite, DORIS)所采用。20 世纪 80 年代中期,法国国家空间研究中心(CNES)、法国国家大地测量研究所(GRGS)和法国国家地理研究所(IGN)共同研发了 DORIS 系统。该系统是一个与 TRANSIT 系统相反的“信标上行”系统,它不像 TRANSIT 系统那样由子午卫星发送导航定位信号,而是由地面播发站向卫星播发无线电信标,星载 DORIS 接收机接收该无线电信标(图 1.1.3(a)),进而测得 2 036.25 MHz 和 401.25 MHz 双频多普勒频移,依此而解算出该颗卫星的在轨实时位置。DORIS 系统是由下列部分组成的:

(1)全球地面定轨播发网。该网是若干地面播发站组成的(图 1.1.3(b)),各

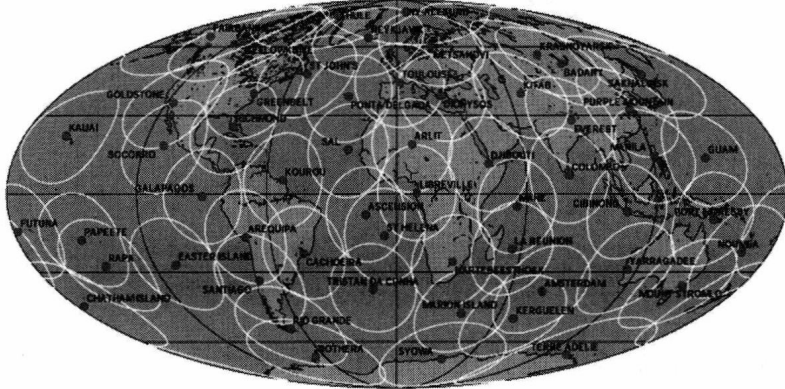
地面播发站以 2 036.25 MHz 和 401.25 MHz 两种射电频率向星载 DORIS 接收机播发无线电信标,作为定轨信号。

(2)星载 DORIS 接收机。现已在下述卫星上装备了 DORIS 接收机:SPOT2、SPOT4、SPOT5、Topex/Poseidon、Jason-1、Envisat、Cryosat 和 Jason-2。

(3)DORIS 控制中心。它的主要功能是系统监测、设备管理、数据处理及其存档保存。



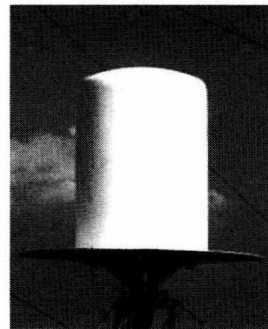
(a) DORIS系统的概貌



(b) DORIS系统的全球地面定轨播发网



(c) DORIS播发机(重达24 kg)



(d) DORIS播发天线

图 1.1.3 DORIS 星载多普勒无线电定轨定位系统

在 Topex/Poseidon 海洋测高卫星上的 DORIS 定轨实用表明, DORIS 定轨的轨道径向误差在  $\pm 3$  cm 以内。如果地面上的用户使用 DORIS 定位接收机, 还可以进行精确的 DORIS 多普勒定位。实用表明, 1 天测量的定位精度, 可达  $\pm (20 \sim 30)$  cm; 5 天测量的定位精度, 可达  $\pm 10$  cm; 15 天测量的定位精度, 可达  $\pm 4$  cm。因此, DORIS 系统占有卫星导航定位市场的一定份额。

2011 年 8 月 16 日在太原卫星发射中心成功发射了我国的 HY-2A 海洋二号卫星, 该颗卫星除了采用星载 GPS 测量定轨和装备了星载激光反射器以外, 还装备了星载 DORIS 定轨接收机, 实施 DORIS、GPS 和激光三种技术的协同定轨, 使我国用三四年走过了国际上三四十年的发展道路, 一举达到国际领先水平。

### 1.1.3 PRARE 精确距离及其变率测量系统

PRARE 的全称为 Precise Range and Range-Rate Equipment, 笔者译作精确距离及其变率测量系统。它是欧洲空间局 (ESA) 为了测定 ERS 欧洲遥感卫星轨道而建立的微波定轨系统。PRARE 系统包括星载微波收发机、地面微波转发站、地面主控站和地面标校站。图 1.1.4 表示 PRARE 系统的基本工作原理。

从图 1.1.4 可见, 星载微波收发机向地面微波转发站发送 8 489 MHz 和 2 248 MHz 两种已调波。8 489 MHz 载波的调制波分别为 10 Mbit/s 的伪噪声码、16 bit/s 低速率的数据码和 2/4/10 kbit/s 高速率的数据码; 2 248 MHz 载波的调制波分别为 1 Mbit/s 的伪噪声码、16 bit/s 低速率的数据码和 2/4/10 kbit/s 高速率的数据码。地面微波转发站, 则以 7 225. 296 MHz ( $= 749 \times 8 489 \text{ MHz} \div 880$ ) 向星载微波收发机转发 10 Mbit/s 的

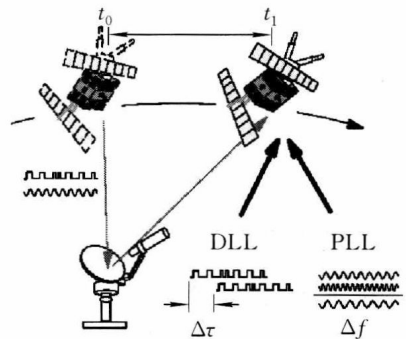


图 1.1.4 PRARE 系统的基本工作原理

伪噪声码、16 bit/s 低速率的数据码和 1 kbit/s 高速率的数据码。星载微波收发机用 DLL 时延锁定环路测出伪噪声码的传播时间, 用 PLL 相位锁定环路测量出多普勒频移。依据这两种观测值, 求解出卫星的在轨实时位置。ERS 卫星已经成功地用 PRARE 进行了定轨测量, 获得了令人满意的定轨成果。

### 1.1.4 卫星多普勒导航系统的功勋与不足

在美国子午卫星导航系统的诱导下, 原苏联海军于 1965 年也开始建立了一个卫星导航系统, 称之为 CICADA。它与 NNSS 系统类似, 也是基于测量多普勒频移的第一代卫星导航系统。目前系统有 12 颗所谓宇宙卫星, 从而构成 CICADA 卫星星座。它的轨道高度为 1 000 km, 卫星沿轨道运行的周期为 105 min, 初期的

宇宙卫星重达 680 kg,近期的宇宙卫星重约 700 kg。每颗宇宙卫星发送频率为 150 MHz 和 400 MHz 的导航定位信号,但只有频率为 150 MHz 的信号作为载波用来传送导航电文;频率为 400 MHz 的信号仅用于削弱电离层效应的影响。宇宙卫星每一分钟发送 3 000 bit 的导航电文,每 50 bit 构成一个导航字码。尽管原苏联没有公开这些导航电文的内容,但是已经被人们破译了。CICADA 卫星导航系统虽已投入使用 20 余年,但对我国用户而言,它的许多技术资料和用户设备至今鲜为人知。

卫星多普勒导航系统(TRANSIT 和 CICADA),是用户只需接收卫星信号而实现导航定位的一种“被动式”导航系统,它开创了被动式无线电导航的新时代。在做卫星多普勒导航定位测量时,卫星导航电文实时地告诉用户卫星的精确在轨点位(动态已知点),开创了卫星在轨位置参与导航解算的技术新途径。地球表面任何一个点位上的用户,只要在其视界“见到”了子午卫星,都可以进行卫星多普勒导航定位测量,开创了全球性无线电导航的新纪元。上述“被动式”、“全球性”和“动态已知点”的科学创立,为后续全球导航卫星系统的建立奠定了坚实的科技基础,提供了成功的实践范例,这就是卫星多普勒导航系统所创立的历史功勋。

子午卫星和 CICADA 卫星导航系统,虽将导航和定位技术推向了一个新的发展时代,但它们仍然存在着一一些明显的不足。对于一个卫星导航系统而言,它用下述四项技术指标衡量其性能优劣:

卫星导航 系统四项 技术指标	{	可用性(availability):用户使用该系统做导航定位的正常运行时间;
		精度(accuracy):该系统用于测得的运动载体在航位置与其真实位置的差异性;
		完好性(integrity):该系统不能用于导航定位的告警能力;
		连续性(continuity):该系统在一个导航周期内出现间断导航的概率。

依上述指标衡量,子午卫星和 CICADA 卫星导航系统主要具有下列不足:

(1)卫星少,不能实行连续导航定位。子午卫星导航系统一般采用 6 颗工作卫星,并且都通过地球的南北极而运行,以致地面上任一点位所见到的子午卫星通过间隔时间较长,而且随着纬度的不同而变更。例如,按 5 颗子午卫星估算,在低纬度地区,每天共通过 15 次左右(仅对仰角在  $15^\circ$  以上而言);而在高纬度地区,每天共有 30 次左右的卫星通过。两次子午卫星通过的间隔时间为 0.8~1.6 h。对于同一颗子午卫星,每天通过次数最多为 13 次,间隔时间便更长一些。由于采用多普勒定位原理,一台卫星多普勒接收机一般需要观测 15 次合格的卫星通过,才能达到 10 m 的单点定位精度。当各个测站观测了公共的 17 次合格的卫星通过,联定位的精度才能达到 0.5 m。子午卫星导航系统不仅因精度较低而限制了它的应用领域,而且因间隔时间和观测时间都较长,而不能为用户提供实时定位和导航服务。

(2)轨道低,难以精密定轨。当进行卫星多普勒定位测量时,子午卫星是作为

一种已知点,只不过它按一定规律而快速地运动着,称之为动态已知点。卫星多普勒定位精度是随着子午卫星定轨误差的显著减小,从十几米提高到零点几米(至少观测 50 次卫星通过)。子午卫星的飞行高度平均仅达到 1 070 km,它属于低轨道卫星。在此情况下,地球引力场模型的误差,大气密度、卫星质面比和大气阻力系数等摄动因素的误差,大气阻力模型自身的误差,都将限制子午卫星定轨精度的提高。换言之,难以提供一种高精度的动态已知点,致使卫星多普勒定位精度局限在米级水平。

(3) 频率低,难以补偿电离层效应的影响。子午卫星的射电频率分别为 400 MHz 和 150 MHz,用这两种频率信号进行双频多普勒定位时,只能削弱电离层效应的低阶项影响,难以削弱电离层效应的高阶项影响。计算表明,在地磁赤道附近,电离层效应的高阶项将导致测站高程 $\pm 1$  m 以上的偏差。因此,采用较高的卫星射电频率,能较好地削弱电离层效应的影响,提高卫星定位精度。

卫星定位技术,是利用人造地球卫星进行点位测量的。在它问世之初,人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标,由地面测站对它进行摄影观测,称之为卫星三角测量。它虽能解决用常规大地测量技术难以实现的陆地、海岛联测定位的问题,但仍旧费时、费力,不仅定位精度低,而且不能测得点位的地心坐标。因此,卫星三角测量很快就被卫星多普勒定位所取代。后者虽较卫星三角测量有了长足的进步,致使卫星定位技术从卫星仅仅作为空间观测目标的低级阶段,发展到了卫星作为动态已知点的高级阶段。但是,当用子午卫星信号进行多普勒定位时,不仅间隔时间过长,而且需要一二天的观测时间,既不能进行连续定位,又达不到厘米级的定位精度,因此子午卫星导航系统的应用受到了较大的限制。为了突破子午卫星导航系统的应用局限性,实现全天候、全天时、全球性和高精度的连续导航与定位,第二代卫星导航系统——GPS 卫星全球定位系统便应运而生。卫星导航定位技术也随之兴起而发展到了一个辉煌的历史阶段。从现行的 GNSS 发展计划可知,2020 年将有 140 余颗导航卫星在轨运行(表 1.1.1),卫星导航产业将成为供水、供电、供气和电信之后的第五大公用事业。其发展空间之大、市场之广,是我们难以想象的(图 1.1.5)。

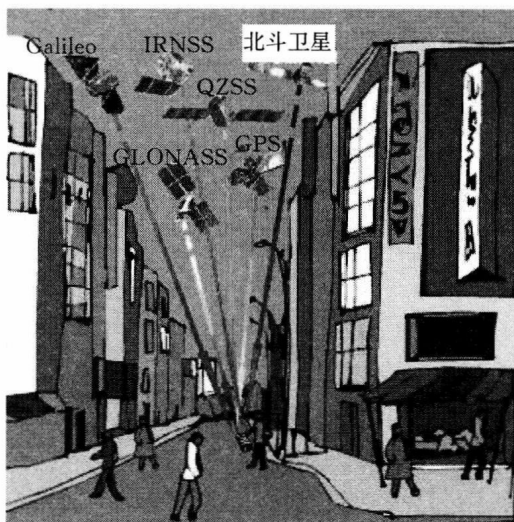


图 1.1.5 GNSS 便于街区定位应用



表 1.1.1 2020 年 GNSS 在轨卫星数

卫星名称	年份			
	2010	2013	2016	2020
GPS	31	31	32	32
GLONASS	23(+2)	24(+3)	24(+3)	24(+3)
北斗	6(+3)	14(+2)	30	32(+3)
Galileo	0	4	18	27(+3)
QZSS	1	1	7	7
IRNSS	0	2	7	7
SBAS	7	8	11	11
总计	68	84	129	140

注:SBAS为星基增强系统的英文缩写,即 Satellite Based Augmentation Systems; DGNSS/DGPS/WAAS/EGNOS 总称为星基增强系统,它们是利用地球静止轨道卫星建立的地区性广域差分增强系统。

本节和后续章节涉及较多的微波波段应用,特此将其划分列入表 1.1.2,供阅读参考。

表 1.1.2 微波波段的划分

波段		波长/cm	频率/MHz
代号	简称/cm		
P	—	130~75	225~400
L	22	75~15	400~2 000
S	10	15~7.5	2 000~4 000
C	5	7.5~3.65	4 000~8 200
X	3	3.65~2.42	8 200~12 400
Ku	2	2.42~1.66	12 400~18 000
K	1.25	1.66~1.13	1 800~26 500
Ka	0.8	1.13~0.75	26 500~40 000
Q-W	0.4	0.75~0.375	40 000~80 000

## § 1.2 GPS 卫星全球定位系统及其新贡献

1973 年 12 月,美国国防部批准它的陆、海、空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统——Navigation by Satellite Timing and Ranging(NAVSTAR)Global Positioning System(GPS),我们称之为 GPS 卫星全球定位系统,简称为 GPS 系统(近年来,个别美国学者将它定义为 Global Positioning Satellite(GPS)Navigation System)。它是美国国防部的第二代卫星导航系统。该系统由三大部分构成: