

卫星导航定位技术系列丛书

北斗导航 定位技术及其应用

BEIDOU DAOHANG DINGWEI JISHU JIQI YINGYONG

主 编 田建波 陈 刚

副主编 陈明剑 李俊毅 荆 炜
刘 兵 盖鹏飞 王广兴



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

卫星导航定位技术系列丛书

北斗导航定位技术及其应用

BEIDOU DAOHANG DINGWEI JISHU JIQI YINGYONG

主 编 田建波 陈 刚

副主编 陈明剑 李俊毅 荆 炜

刘 兵 盖鹏飞 王广兴

图书在版编目(CIP)数据

北斗导航定位技术及其应用/田建波,陈刚主编. —武汉:中国地质大学出版社,2017.4
(卫星导航定位技术系列丛书)
ISBN 978-7-5625-4024-3

- I. ①北…
- II. ①田…②陈…
- III. ①卫星导航-全球定位系统-介绍-中国
- IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 062081 号

北斗导航定位技术及其应用		田建波 陈 刚 主编
责任编辑:胡珞兰	选题策划:蓝 翔	责任校对:张咏梅
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮编:430074
电 话:(027)67883511	传真:(027)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×1 092 毫米 1/16	字数:350 千字	印张:13.75
版次:2017 年 4 月第 1 版	印次:2017 年 4 月第 1 次印刷	
印刷:武汉市教文印刷厂	印数:500 册	
ISBN 978-7-5625-4024-3		定价:68.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

北斗卫星导航定位系统是我国自主研发的全球卫星导航定位系统。在研发过程中,结合我国国情,科学合理地提出北斗卫星导航定位系统建设的“三步走”规划:第一步是试验阶段,即用2颗地球同步静止轨道卫星来完成试验任务,为北斗卫星导航定位系统建设积累技术经验、培养人才,研制一些地面应用基础设施设备等;第二步是到2012年,发射14颗卫星,建成覆盖亚太区域的北斗卫星导航定位系统(即“北斗二号”区域系统),为亚太地区用户提供定位、测速、授时、广域差分 and 短报文通信服务;第三步是建设北斗全球卫星导航定位系统,2020年前后,将完成35颗卫星发射组网,为全球用户提供服务。

1984年初我国开始酝酿利用地球静止轨道卫星进行导航定位的技术方案,1994年,我国正式开始北斗卫星导航试验系统(“北斗一号”)的研制。2000年10月31日,第一颗“北斗一号”实验导航卫星升空;2007年4月14日,成功将第一颗实用北斗导航卫星送入太空;2010年1月17日,将第三颗北斗导航卫星送入预定轨道,“北斗一号”卫星导航系统正式运行。

2004年,中国启动了具有全球导航能力的北斗卫星导航系统的建设(“北斗二号”);2010年4月29日军用标准时间正式启用,并通过北斗导航系统进行发播;2011年12月28日起,开始向中国及周边地区提供连续的导航定位服务;2012年10月1日“长河二号”授时系统开始发播军用标准时间。2012年底我国完成14颗卫星的发射,形成区域服务能力,“北斗二号”正始运行,向亚太大部分地区正式提供连续无源定位、导航、授时等服务。

2013年起陆续发射组网卫星,至2020年将完成35颗卫星发射,形成全球范围内服务能力。

本书从北斗卫星组成、坐标系统、时间系统、导航定位的基本原理及应用等方面,相对全面地介绍了整个北斗系统的构成,为大家了解及应用北斗导航定位系统提供参考。

本书由解放军第一测绘导航基地田建波,中国地质大学(武汉)陈刚,解放军信息工程大学陈明剑、李俊毅,解放军卫星定位总站荆炜等编写完成。其中第1章、第3章、第7章由田建波编写;第2章、第6章由刘兵、盖鹏飞编写;第8章由荆炜、田建波编写;第4章由李俊毅编写;第5章由陈明剑编写;第9章及附录由陈刚、王广兴编写。全书由田建波、陈刚统稿。书内插图由解放军第一测绘导航基地韩雪峰完成,封面由解放军第一测绘导航基地崔旭钊设计。在全书的编写过程中,石家庄经纬度科技有限公司、西安测绘研究所、北京卫星导航定位总站均提供了大量资料和建议。

本书在编写过程中参阅和引用了国内外有关学者的著作和发表的文献资料,在此对这些作者们表示感谢!

由于作者水平有限,书中疏漏或不正确之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2016年11月

目 录

1	北斗导航系统概述	(1)
1.1	北斗卫星导航系统发展历程	(2)
1.2	北斗卫星导航系统特点	(4)
1.3	系统应用	(6)
2	北斗的坐标及时间系统	(10)
2.1	几种常用地心坐标系	(10)
2.2	北斗的坐标系统	(14)
2.3	时间系统	(15)
2.4	北斗授时	(24)
3	北斗系统构成	(26)
3.1	“北斗一号”导航系统	(26)
3.2	“北斗二号”导航系统	(29)
3.3	北斗全球卫星导航定位系统	(38)
3.4	卫星轨道	(39)
3.5	北斗系统空间信号特征	(43)
3.6	北斗系统服务性能特征	(45)
4	北斗导航基本原理	(46)
4.1	伪距定位原理	(46)
4.2	载波相位定位原理	(51)
4.3	基于多频观测数据线性组合	(59)
4.4	常用周跳探测与修复方法	(64)
4.5	多频观测数据在模糊度解算中的应用	(72)
5	北斗卫星星历	(84)
5.1	BDS 广播星历	(84)
5.2	北斗精密星历	(91)
5.3	北斗导航电文介绍	(94)
6	北斗测量与应用	(101)
6.1	相对定位测量	(101)
6.2	测速与定向	(103)
6.3	影响相对测量误差的因素	(106)
7	网络 RTK(CORS) 系统	(113)
7.1	国内外 CORS 情况	(113)

7.2	CORS 系统的组成	(115)
7.3	RTCM 电文与 NTRIP 协议	(117)
7.4	综合误差内插法(CBD)技术	(125)
7.5	区域改正参数(FKP)技术	(127)
7.6	虚拟参考站技术	(128)
7.7	主辅站技术(MAC)	(132)
7.8	广播式网络 RTK 技术	(143)
7.9	CORS 系统建设	(145)
7.10	移动 CORS 系统	(159)
7.11	应用服务	(165)
8	北斗设备及测试	(168)
8.1	北斗导航接收机构成	(168)
8.2	导航设备	(170)
8.3	北斗定时型接收机	(178)
8.4	车载北斗定向仪	(190)
8.5	北斗测量设备	(191)
9	北斗技术应用	(194)
9.1	灾害监测	(194)
9.2	交通运输与特殊车辆管理	(198)
9.3	精准化农业	(199)
9.4	在林业工作中的应用	(203)
9.5	在军事上的应用	(205)
9.6	在电力系统的应用	(206)
	缩略语	(208)
	参考文献	(210)

1 北斗导航系统概述

中国北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)(以下也可简称北斗系统)是我国自行研制的全球卫星定位与通信系统,是继美国全球卫星定位系统(Global Positioning System,GPS)和俄罗斯全球卫星导航系统(GLONASS)之后第三个成熟的卫星导航系统。系统由空间端、地面端和用户端组成,可在全球范围内全天候和全天时为各类用户提供高精度和高可靠的定位、导航、授时服务,并具短报文通信能力,已经初步具备区域导航、定位和授时能力,定位精度优于 20m,授时精度优于 100ns。2012 年 12 月 27 日,北斗系统空间信号接口控制文件正式版 1.0 正式公布,北斗导航业务正式对亚太地区提供无源定位、导航、授时服务。

自 1957 年 10 月 4 日苏联第一颗人造卫星上天,约翰·霍普金斯大学应用物理研究所的弗兰克·T·麦柯卢尔利用乔治·C·韦范巴赫和威廉·H·吉尔发现的多普勒效应,发明了第一个卫星导航系统。美国 1960 年发射第一颗子午仪卫星,1963 年系统建成,由 6 颗卫星组成,1964 年服役,1967 年向民用开放,1996 年正式退役,为美国海军和民用用户服务了 33 年。苏联于 1967 年 11 月 27 日发射了第一颗导航卫星,1979 年系统交付使用,由 4 颗卫星组成,位于高度在 1 000km 的圆轨道上,倾角 83° ,沿赤道均匀分布。根据当时情况,我国在 20 世纪 60 年代末也有过一个类似于“子午仪”的研制计划,但直到 1984 年初才开始酝酿利用地球静止轨道卫星进行导航定位的技术方案。首先由陈芳允院士提出,利用两颗地球静止轨道卫星测定用户位置的卫星定位系统的概念,可见,这个概念与美国和苏联的“子午仪”卫星系统相差很大,难度也可想而知。与此同时,美国 Gerard K. O'Neill 博士也进行了同样的研究。1985 年 7 月,美国联邦通信委员会(FCC)以导航和个人通信为目标,命名为卫星无线电测定业务(RDSS),1986 年 6 月 FCC 批准了这个标准,并得到国际电信联盟的认可。中国的“北斗一代”卫星导航系统就是在 RDSS 基础上开始研制的。这种导航系统的特点是,由用户以外的中心控制系统通过用户对卫星信号的询问、应答获得距离观测量,由中心控制系统计算用户的位置坐标,并将此信息传送给用户。这种具有导航和通信功能的系统,有效地将导航定位与通信相结合,为用户提供极大方便。1994 年“双星导航定位系统”正式立项,2000 年 10 月 31 日、12 月 21 日成功发射了两颗北斗卫星,建成了中国第一代卫星导航定位系统(“北斗一代”,图 1-1),2003 年 5 月 25 日发射了第三颗北斗导航卫星,使系统进入稳定运行阶段。

在经历了第一代卫星导航系统研制与应用后,各国在不同条件下,开始了第二代卫星导航系统的研制与建设。1964 年美国在第一代导航系统投入使用不久,就着手进行新一代卫星导航系统的研究工作,1973 年美国国防部正式批准美陆、海、空三军共同研究国防卫星导航系统——全球定位系统(GPS),由 24 颗高度为 20 200km 的卫星形成空间部分——卫星星座。自 1978 年开始,共成功发射了 10 颗试验卫星(BLOCK I)。在试验成功的基础上,1989 年开始发射正式导航卫星 BLOCK II 和 BLOCK II R,1995 年发射完毕。苏联 1982 年 10 月 12 日发射了第一颗 GLONASS 卫星,1996 年 1 月 18 日宣布 GLONASS 建成,空间部分由 24 颗卫星组成。

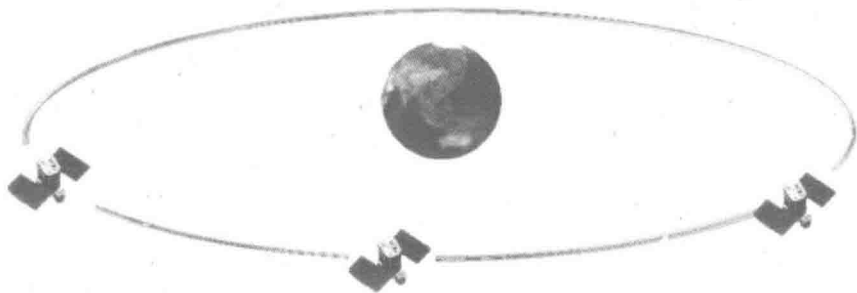


图 1-1 “北斗一代”导航卫星

1.1 北斗卫星导航系统发展历程

1970 年代,中国开始研究卫星导航系统的技术和方案,但之后这项名为“灯塔”的研究计划被取消。1983 年,中国航天专家陈芳允提出使用两颗静止轨道卫星实现区域性的导航功能,1989 年,中国使用通信卫星进行试验,验证了其可行性。1994 年,中国正式开始北斗卫星导航试验系统(“北斗一号”)的研制,2007 年 4 月 14 日 4 时 11 分,我国在西昌卫星发射中心用“长征三号甲”运载火箭,成功将第一颗北斗导航卫星送入太空;2009 年 4 月 15 日零时 16 分,中国成功将第二颗北斗导航卫星送入预定轨道。2010 年 1 月 17 日 0 时 12 分,将第三颗北斗导航卫星送入预定轨道,这标志着北斗卫星导航系统工程建设迈出重要一步,卫星组网正按计划稳步推进。

2004 年,中国启动了具有全球导航能力的北斗卫星导航系统的建设(“北斗二号”)。2007 年 2 月 3 日,“北斗一号”第四颗卫星发射成功,该卫星不仅作为早期三颗卫星的备份,同时还将进行北斗卫星导航定位系统的相关试验。至此,“北斗一号”已有 4 颗卫星在太空遨游,组成了完整的卫星导航定位系统,确保全天候、全天时提供卫星导航资讯。

2009 年起,后续卫星陆续发射。2010 年 4 月 29 日军用标准时间正式启用,并通过北斗导航系统进行发播;2011 年 12 月 28 日起,开始向中国及周边地区提供连续的导航定位服务;2012 年 10 月 1 日“长河二号”授时系统开始发播军用标准时间。2012 年 12 月 27 日起,形成区域服务能力,“北斗二号”(图 1-2)正始运行,系统在继续保留北斗卫星导航试验系统有源定位、双向授时和短报文通信服务的基础上,向亚太大部分地区正式提供连续无源定位、导航、授时等服务;民用服务与 GPS 一样免费。

1.1.1 系统规化

北斗卫星导航试验系统(也称“双星定位导航系统”)为我国“九五”项目,其工程代号取名为“北斗一号”。结合我国国情,科学合理地提出并制订自主研制实施北斗卫星导航系统建设的“三步走”规划:第一步是试验阶段,即用少量卫星利用地球同步静止轨道来完成试验任务,为北斗卫星导航系统建设积累技术经验、培养人才,研制一些地面应用基础设施设备等。1994 年,启动“北斗一号”系统工程建设;2000 年,发射 2 颗地球静止轨道卫星,建成系统并投入使

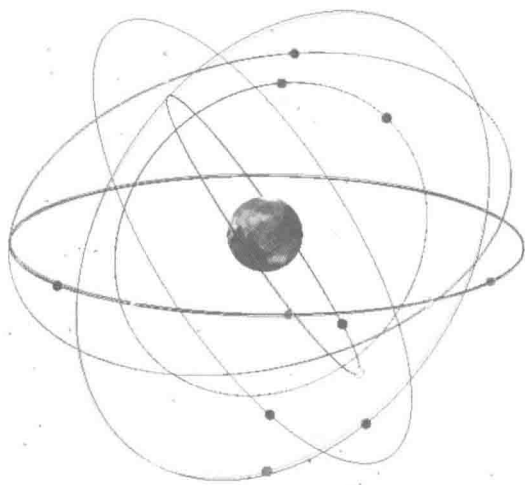


图 1-2 “北斗二号”卫星

用,采用有源定位体制,为中国用户提供定位、授时、广域差分 and 短报文通信服务;2003 年,发射第三颗地球静止轨道卫星,进一步增强系统性能。第二步是到 2012 年,发射 14 颗卫星,由 5 颗地球静止轨道卫星、5 颗假倾斜轨道卫星和 4 颗中轨卫星组成,建成覆盖亚太区域的北斗卫星导航定位系统(即“北斗二号”区域系统)。“北斗二号”系统在兼容“北斗一号”技术体制的基础上,增加无源定位体制,为亚太地区用户提供定位、测速、授时、广域差分 and 短报文通信服务。第三步是建设北斗全球卫星导航定位系统。2009 年,启动北斗全球卫星导航定位系统建设,继承北斗有源服务和无源服务两种技术体制;计划 2018 年,面向“一带一路”沿线及周边国家提供基本服务;2020 年前后,将完成 35 颗卫星发射组网(图 1-3),为全球用户提供服务。

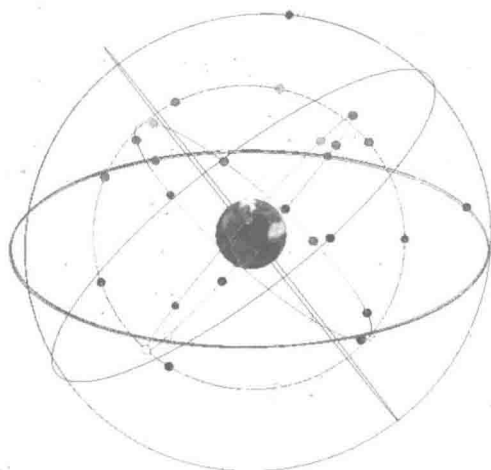


图 1-3 35 颗北斗导航卫星示意图

1.1.2 实现目标

北斗卫星导航系统致力于向全球用户提供高质量的定位、导航和授时服务,包括开放服务和授权服务两种方式。开放服务是向全球免费提供定位、测速和授时服务,定位精度 20m,测速精度 0.2m/s,授时精度 10ns。授权服务是为有高精度、高可靠卫星导航需求的用户,提供定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

1.2 北斗卫星导航系统特点

1.2.1 定位方式

北斗定位系统定位方式有:有源定位和无源定位两种。

(1)有源定位。用户终端通过导航卫星向地面控制中心发出一个申请定位的信号,之后地面控制中心发出测距信号,根据信号传输的时间得到用户与两颗卫星的距离。除了这些信息外,地面控制中心还有一个数据库,为地球表面各点至地球球心的距离,当认定用户也在此不均匀球面的表面时,交会定位的条件已经全部满足,控制中心可以计算出用户的位置,并将信息发送到用户的终端。北斗的试验系统完全基于此技术,而之后的北斗卫星导航系统除了使用新的技术外,也保留了这项技术。

(2)无源定位。用户终端不需要向控制中心发出申请,而是接收 4 颗导航卫星发出的信号,可以自行计算其空间位置。此即为 GPS 所使用的技术,北斗卫星导航系统也使用了此技术来实现全球的卫星定位。

根据导航卫星的信号覆盖范围,卫星导航系统还可分为区域卫星导航系统和全球卫星导航系统。区域系统有中国的北斗导航试验系统、印度的区域导航卫星系统(IRNSS)等,全球系统有美国的全球定位系统(GPS)、俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS)以及欧洲的“伽利略”(GALILEO)系统和中国的北斗卫星导航系统。

1.2.2 码分多址技术

北斗卫星导航系统使用码分多址技术,与全球定位系统和伽利略定位系统一致,而不同于 GLONASS 的频分多址技术。两者相比,码分多址有更高的频谱利用率,在 L 波段的频谱资源非常有限的情况下,选择码分多址是更妥当的方式。

码分多址技术允许所有使用者同时使用全部频带,每个用户分配一个特殊的地址码,在接收端只有用与发射信号相匹配的接收机才能检出与发射地址码相符合的信号。

频分多址是将可以使用的总频带分割为若干互不相交的频带(子频带),将每个子频带分配给一个特殊的用户使用,在接收端使用带通滤波器滤出其他频率信号,从而获取自身频率信号。

在技术发展上,先有频分多址方式,后来出现码分多址方式,可以说后者比前者更先进。设计一个技术比较先进的导航星座,选择码分多址方式调制导航信号,在很多方面比频分多址方式更具优越性,例如:抗干扰性能、与其他导航系统的兼容、接收机的设计等。而且,在相同

指标约束下,使用频分多址的方式调制导航信号,无论对空间段还是用户机而言,实现起来技术复杂度都要高一些。

另外,从系统设计的角度,码分多址对频谱的利用率更高。由于目前 L 频段的频谱资源极其有限,已经不能像 GLONASS 设计的年代那样“奢侈”地使用频率资源了,因此北斗和 GPS、伽利略一样采用了码分多址方式。

1.2.3 北斗信号频率

北斗卫星导航系统的官方宣布,在 L 波段和 S 波段发送导航信号,在 L 波段的 B1、B2、B3 频点(B1 频点为 1 559.052~1 591.788MHz;B2 频点为 1 166.220~1 217.370MHz;B3 频点为 1 250.618~1 286.423MHz)上发送服务信号,包括开放的信号和需要授权的信号。

国际电信联盟分配了 E1(1 590MHz)、E2(1 561MHz)、E6(1 269MHz)和 E5B(1 207MHz)四个波段给北斗卫星导航系统,这与伽利略定位系统使用或计划使用的波段存在重合。然而,根据国际电信联盟的频段先占先得政策,若北斗系统先行使用,即拥有使用相应频段的优先权。2007 年,中国发射了北斗之后,在相应波段上检测到信号:1 561.098±2.046MHz, 1 589.742MHz, 1 207.14±12MHz, 1 268.52±12MHz,以上波段与伽利略定位系统计划使用的波段重合,与全球卫星定位系统的 L 波段也有小部分重合。

1.2.4 北斗卫星组成

“北斗二号”卫星导航系统由空间段、控制段和用户段 3 个部分组成。空间段由 14 颗工作卫星组网,其中有 5 颗静止地球同步轨道卫星(GEO)、5 颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)和 4 颗中圆轨道卫星(MEO)。所有卫星均提供无线电导航业务,GEO 卫星还提供无线电测定业务。

采用 3 种轨道卫星的组合,其好处在于,通过较少的卫星数量,就能使“北斗”区域系统实现对覆盖区服务性能的保证。实际上,在目前的“北斗”区域系统中,通过地球静止轨道卫星和倾斜地球同步轨道卫星就能保证区域内服务性能的要求,可以不需要 4 颗中圆轨道卫星。但是,从未来北斗全球系统的整个发展和规划来讲,主要还是依赖于中圆轨道卫星来保证全球覆盖。

从北斗系统“三步走”的发展战略部署来看,先解决区域问题,然后再全球覆盖,所以在区域系统中必须要部署地球静止轨道卫星和倾斜地球同步轨道卫星,同时,又要考虑下一步的全球系统建设,因此在目前的区域系统中开展了必要的技术验证,包括对这种混合星座进行评估。

具体来说,中圆轨道卫星所起的作用主要有 3 个方面:第一,可以验证混合星座的可行性,看看是否能达到预先设计的指标。第二,从系统的可靠性和稳定性上来说,4 颗中圆轨道卫星可以对“5+5”的星座部署起到周期性的改善作用;如果有一两颗在轨的倾斜地球同步轨道卫星发生故障,那么中圆轨道卫星可以通过轨道调整,起到替代失效卫星的作用,也就是说,中圆轨道卫星具有在轨备份的功能。第三,为未来部署全球导航系统提供经验。

1.2.5 北斗系统的发展特色

北斗系统的建设实践,实现了在区域快速形成服务能力、逐步扩展为全球服务的发展路径,丰富了世界卫星导航事业的发展模式。

北斗系统具有以下特点:一是空间段采用3种轨道卫星组成的混合星座,与其他卫星导航系统相比高轨卫星更多,抗遮挡能力强,尤其低纬度地区性能特点更为明显;二是提供多个频点的导航信号,能够通过多频信号组合使用等方式提高服务精度;三是创新融合了导航与通信能力,具有实时导航、快速定位、精确授时、位置报告和短报文通信服务五大功能。

1.2.6 持续提升北斗系统性能

为满足日益增长的用户需求,北斗系统将加强卫星、原子钟、信号体制等方面的技术研发,探索发展新一代导航定位授时技术,持续提升服务性能。

(1)提供全球服务。发射新一代导航卫星,研制更高性能的星载原子钟,进一步提高卫星性能与寿命,构建稳定可靠的星间链路;增发更多的导航信号,加强与其他卫星导航系统的兼容与互操作,为全球用户提供更好的服务。

(2)增强服务能力。大力建设地面试验验证系统,实现星地设备全覆盖测试验证;持续建设完善星基和地基增强系统,大幅提高系统服务精度和可靠性;优化位置报告及短报文通信技术体制,扩大用户容量,拓展服务区域。

(3)保持时空基准。北斗系统时间基准(北斗时),溯源于协调世界时,时差信息在导航电文中发播;推动与其他卫星导航系统开展时差监测,提高兼容与互操作性能。发展基于北斗系统的全球位置标识体系,推动北斗系统坐标框架与其他卫星导航系统的互操作,并不断精化参考框架(中国北斗卫星导航系统白皮书)。

1.3 系统应用

中国积极培育北斗系统的应用开发,打造由基础产品、应用终端、应用系统和运营服务构成的北斗产业链,持续加强北斗产业保障、推进和创新体系,不断改善产业环境,扩大应用规模,实现融合发展,提升卫星导航产业的经济和社会效益。

1.3.1 构建产业保障体系

(1)出台有关产业政策。中国已制订了卫星导航产业发展规划,对卫星导航产业中长期发展进行了总体部署,鼓励国家部门与地方政府出台支持北斗应用与产业化发展的有关政策。

(2)营造公平的市场环境。努力建立竞争有序的导航产业发展环境,提高资源配置效益和效率;鼓励并支持国内外科研机构、企业、高等院校和社会团体等组织,积极开展北斗应用开发,充分释放市场活力。

(3)加强标准化建设。2014年,成立了全国北斗卫星导航标准化技术委员会,建立并完善北斗卫星导航标准体系,推动标准验证与实施,着力推进基础、共性、急需标准的制(修)订,全面提升卫星导航标准化发展的整体质量效益。

(4)构建产品质量体系。着力建立健全卫星导航产品质量保障公共服务平台,积极推进涉及安全领域的北斗基础产品及重点领域应用产品的第三方质量检测、定型及认证,规范卫星导航应用服务和运营,培育北斗品牌。逐步建立卫星导航产品检测和认证机构,强化产品采信力度,促进北斗导航产品核心竞争力的全面提升,推动北斗导航应用与国际接轨。

(5)建设位置数据综合服务体系。基于北斗增强系统,鼓励采取商业模式,形成门类齐全、互联互通的位置服务基础平台,为地区、行业 and 大众共享应用提供支撑服务。

1.3.2 构建产业应用推进体系

(1)推行国家关键领域应用。在涉及国家安全和国民经济发展的关键领域,着力推进北斗系统及兼容其他卫星导航系统的技术与产品的应用,为国民经济稳定安全运行提供重要保障。

(2)推进行业和区域应用。推动卫星导航与国民经济各行业的深度融合,开展北斗行业示范,形成行业综合应用解决方案,促进交通运输、国土资源、防灾减灾、农林水利、测绘勘探、应急救援等行业转型升级。鼓励结合“京津冀协同发展”“长江经济带”以及“智慧城市发展”等国家区域发展战略需求,开展北斗区域示范,推进北斗系统市场化、规模化应用,促进北斗产业和区域经济社会发展。

(3)引导大众应用。面向智能手机、车载终端、穿戴式设备等大众市场,实现北斗产品小型化、低功耗、高集成,重点推动北斗兼容其他卫星导航系统的定位功能成为车载导航、智能导航的标准配置,促进在社会服务、旅游出行、弱势群体关爱、智慧城市等方面的多元化应用。

1.3.3 构建产业创新体系

(1)加强基础产品研发。突破核心关键技术,开发北斗兼容其他卫星导航系统的芯片、模块、天线等基础产品,培育自主的北斗产业链。

(2)鼓励创新体系建设。鼓励支持卫星导航应用技术重点实验室、工程(技术)研究中心、企业技术中心等创新载体的建设和发展,加强工程实验平台和成果转化平台能力建设,扶持企业发展,加大知识产权保护力度,形成以企业为主体、产学研用相结合的技术创新体系。

(3)促进产业融合发展。鼓励北斗与互联网+、大数据、云计算等融合发展,支持卫星导航与移动通信、无线局域网、伪卫星、超宽带、自组织网络等信号的融合定位及创新应用,推进卫星导航与物联网、地理信息、卫星遥感/通信、移动互联网等新兴产业融合发展,推动大众创业、万众创新,大力提升产业创新能力。(中国北斗卫星导航系统白皮书)

北斗卫星导航系统除具有导航定位、守时功能外,还具有通信功能,这就决定了它在应用方面比 GPS 更广泛。GPS 只能确定使用者的位置,而北斗不仅能确定使用者位置,还能让别人知道他的位置,这一特点,在抢险救灾中尤为重要。

北斗卫星导航试验系统自 2003 年正式提供服务以来,我国卫星导航应用在理论研究、应用技术研发、接收机制造及应用与服务等方面取得了长足进步。随着北斗系统建设和无源导航定位服务能力的发展,北斗和其他卫星导航系统的多模芯片、天线、板卡等关键技术已取得突破,掌握了自主知识产权,实现了产品化,在交通运输、海洋渔业、水文监测、气象测报、森林防火、通信系统、电力调度、救灾减灾和国家安全等领域得到广泛应用,产生了显著的社会效益和经济效益。特别是在南方冰冻灾害、四川汶川和青海玉树抗震救灾、北京奥运会、上海世博会以及纪念抗日战争胜利 70 周年阅兵期间发挥了重要作用。

1.3.3.1 军事应用方面

北斗卫星导航定位系统基本上是以满足商用服务为主,虽然目前军事用途仍有限,不过它

仍具有雄厚的军事应用潜力,这也是我国未来发展的重点。理由很简单,虽然我国卫星导航定位应用近年来发展迅速,但是绝大多数的军民应用范畴都是建立在美国 GPS 之上。一旦美国关闭 GPS 或加大民用码误差,众多行业将受重大影响。所以我国必须未雨绸缪,发展自主的卫星导航定位系统。

其实北斗卫星导航定位系统的军事功能与 GPS 类似,如飞机、导弹、水面舰艇和潜艇的定位导航;弹道导弹机动发射车、自行火炮与多管火箭发射车等武器载具发射位置的快速定位,以缩短反应时间;人员搜救、水上排雷定位等。不过,因运作方式不同,北斗卫星导航定位系统有一些 GPS 不具备的军事功能,其中最重要的就是部队的指挥管制。由于北斗卫星导航定位系统的简短通信功能可进行“群呼”,如集团用户中心发出的各种指令经“北斗”指挥型用户机上传至“北斗”卫星,接着转给地面控制中心,再经出站链路传至“北斗”卫星向目标用户转发,使得集团用户中心可对其下属用户进行指挥调度。另外,当用户提出申请或按预定间隔时间进行定位时,不仅用户知道自己的测定位置,而且其调度指挥的上层单位或其他有关单位也可得知用户所在位置。

这项功能用在军事上,意味着可主动进行各级部队的定位,也就是说我军各级部队一旦配备北斗卫星导航定位系统,除了可供自身定位导航外,高层指挥部也可随时通过北斗系统掌握部队位置,并传递相关命令,对任务的执行有相当大的助益。换言之,我军可利用北斗卫星导航定位系统执行部队指挥与管制及战场管理。

1.3.3.2 民用方面

北斗导航定位系统服务区域为中国及周边国家和地区,它可以在服务区域内任何时间、任何地点,为用户确定其所在的地理经纬度信息,并提供双向短报文通信和精密授时服务。北斗系统可广泛应用于船舶运输、公路交通、铁路运输、海上作业、渔业生产、水文测报、森林防火、环境监测等众多行业,以及军警、公安、海关等其他有特殊指挥调度要求的单位(表 1-1)。

表 1-1 北斗卫星导航系统应用领域

应用领域	系统应用内容
交通运输	重点运输监控管理、公路基础设施、港口高精度实时定位调度监控
海洋渔业	船位监控、紧急救援、信息发布、渔船出入港管理
水文监测	多山地域水文测报信息的实时传输
气象监测	气象测报型北斗终端设备,大气监测预警系统应用解决方案
森林防火	定位、短报文通信
通信时统	开展北斗双向授时,研制出一体化卫星授时系统
电力调度	基于北斗的电力时间同步
救灾减灾	提供实时救灾指挥调度,应急通信,信息快速上报、共享
军工领域	定位导航;发射位置的快速定位;搜救、排雷定位等

在交通运输方面,北斗系统广泛应用于重点运输过程监控管理、公路基础设施安全监控、港口高精度实时定位调度监控等领域。

在海洋渔业方面,北斗系统也已起到了很大的作用,主要的原理是针对不同种类的鱼群随着洋流定期洄游的特点,利用北斗系统的定位来寻找将要到达某个点的鱼群,渔船和鱼群交汇就可以捕到大量的鱼。另外,它还可以确保渔船在海上安全作业,因为北斗试验系统既有定位功能,又有通信功能,当有台风或者海况不好的时候,可以及时通报情况,让渔船安全返回,为渔业管理部门提供船位监控、紧急救援、信息发布、渔船出入港管理等服务。

在水文监测方面,成功应用于多山地域水文测报信息的实时传输,提高灾情预报的准确性,为制订防洪抗旱调度方案提供重要支持。

在气象测报方面,成功研制一系列气象测报型北斗终端设备,启动“大气海洋和空间监测预警示范应用”,形成实用可行的系统应用解决方案,实现气象站之间的数字报文自动传输。

在森林防火方面,成功应用于森林防火,定位与短报文通信功能在实际应用中发挥了较大作用。

在通信系统方面,成功开展北斗双向授时应用示范,突破光纤拉远等关键技术,研制出一体化卫星授时系统。

在电力调度方面,成功开展基于北斗的电力时间同步应用示范,为电力事故分析、电力预警系统、保护系统等高精度时间应用创造了条件。

在救灾减灾方面,基于北斗系统的导航定位、短报文通信以及位置报告功能,提供全国范围的实时救灾指挥调度、应急通信、灾情信息快速上报与共享等服务,显著提高了灾害应急救援的快速反应能力和决策能力。

北斗试验系统还开发了基于北斗的森林防火系统,在消防车上装上具有通信功能的北斗定位接收机,可以引导消防车和消防人员及时到达火灾现场救灾,或进行人员调度指挥。

在水资源管理方面也已经开始应用。如水资源监控,它可以实时监测和传递江河的水温等水环境,包括水污染的信息,以及在海洋监测海潮的信息,其中,海潮的信息在科学上、工程上、民用上、渔业上都有广泛的应用。

在大气环境监测方面,很多高原地区基于北斗的气象监测站可将气象数据实时发送到气象中心,进行统一计算。气象预报需要用很广泛的区域资料才能得到预报。

北斗系统在汶川、舟曲地震的救灾过程中发挥了很大的作用。北斗有定位和特有的短报文通信功能,可以及时把位置信息报给救灾指挥部。而当地在灾害的情况下,作为生命线的通信设施已经完全破坏了,唯一有用的就是北斗系统,北斗的短报文通信功能在救灾过程中发挥了特别重要的作用。

在精密农业方面,北斗的实时精密定位将应用于土地和农田的整理和管理,北斗终端装在拖拉机和收割机等农业机械上,能够以 0.1m 的定位精度实现对农田的精密耕作。我们现在耕种面积是以亩为单位的,大概是 666m^2 ,将来是以 $(0.1 \times 0.1)\text{m}^2$ 的精度水平进行工作。

2 北斗的坐标及时间系统

2.1 几种常用地心坐标系

全球卫星导航定位系统都有自己的坐标系统,如美国 GPS 坐标系为 WGS84,俄罗斯 GLONASS 坐标系为 PZ90,中国北斗系统为 CGCS2000。另外,常用于 GNSS 数据处理的还有国际地球自转服务局(IERS)定义的 ITRF 框架。

2.1.1 WGS84 坐标系

WGS84 是 1984 世界大地坐标系(World Geodetic System)的简称。它是美国国防制图局于 1984 年建立的,是 GPS 卫星星历的参考基准,是协议地球参考系的一种,其基本参数见表 2-1。该系列先后有 WGS60、WGS72 以及 WGS84,其后的发展演变为 WGS84(G730)、WGS84(G873)、WGS84(G1150)和最新完成的 WGS84(G2024)。

表 2-1 WGS84 的基本参数

参数	符号	数值
长半轴(m)	A	6 378 137.0
扁率	$1/f$	298.257 223 563
地球自转角速度(rad/s)	ω	$7\,292\,115.0 \times 10^{-11}$
卫星应用角速度(rad/s)	ω	$7\,292\,115.146\,7 \times 10^{-11}$
地球重力位常数(m^3/s^2)	GM	$3\,986\,004.418 \times 10^8$

2.1.2 ITRF 参考框架起源

国际地球参考框架(ITRF)是由国际地球自转服务局按一定要求建立地面观测台站进行空间大地测量,并根据协议地球参考系的定义,采用一组国际推荐的模型和常数系统对观测数据进行处理,解算出各观测台站在某一历元的坐标和速度场,由此建立的一个协议地球参考框架。它是协议地球参考系的具体实现。

国际地球自转服务局 1988 年 1 月 1 日成立,成立后相继发表了 ITRF88、ITRF89、ITRF90、ITRF91、ITRF92、ITRF93、ITRF94、ITRF96、ITRF97、ITRF2000、ITRF2005 和 ITRF2008 参考框架。从上面可看出,在 1997 年以前,几乎每年更新一次,其后随着框架精度的渐趋稳定,更新周期逐渐延长。

IERS 采用多种空间技术手段来维持 ITRF 框架,主要技术是:VLBI、SLR、LLR 和 1991 年加入的 GPS,从 1994 年起又加入了卫星轨道跟踪和无线电定位(DORIS)。IERS 下面有多个分布在全球的分中心,各分中心以某种技术为主完成自身观测结果的处理和分析,得出以某种特定技术(如 VLBI)为依据的站坐标、速度及地球自转参数(ERP);然后由 IERS 中心局(IERS CB)对各个分中心获得的结果采用一定的方法进行综合分析处理,获得站坐标、速度及 ERP 的综合结果,以此结果建立国际地球参考系和国际地球参考架(ITRS 和 ITRF),并以年报的形式向全球发布。

在建立和维持 ITRF 框架的过程中,由于采用的技术方法和考虑的问题不同,不同时期的 ITRF 框架对其坐标原点、尺度和定向的定义也不相同。

2.1.2.1 ITRF88~ITRF93 框架定义

原点 and 尺度:由所选定的 SLR 解的平均值确定。

定向:ITRF88~ITRF92 的定向与 BTS87 坐标系(1987 年国际时间局利用 VLBI、SLR 和卫星多普勒测量资料建立的一种坐标系)定向一致;ITRF93 的定向和变率与 IERS 的地球定向参数(EOP)一致。

2.1.2.2 ITRF94~ITRF97 框架定义

原点:由所选定的 SLR 解和 GPS 解的加权平均值来确定。

尺度:由 VLBI、SLR 和 GPS 解的加权平均值来确定,加入了 0.7×10^{-9} 尺度改正。

定向:与 ITRF92 保持一致。

2.1.2.3 ITRF2000 框架定义

原点:SLR 解的加权平均值所对应的原点与 ITRF 的原点间的平移参数及其变率均设为零。

尺度:将 VLBI 和所有可靠的 SLR 解的加权平均值的尺度与 ITRF 的尺度之间的尺度比和尺度比的变率均设为零。此外,ITRF2000 的尺度是在地球时(TT)框架内的尺度,而不再采用地心坐标时(TCG)框架中的尺度。

定向:与历元 1997.0 时的 ITRF 的定向一致。其速率与 NNR-NUVEL-1A 的模型相同。为满足 IERS 的定义,在确定 ITRF2000 的定向及其变率时,采用了精度和稳定性都较好的测站。

2.1.2.4 ITRF2005 框架

2006 年 10 月,IERS 发布了 ITRF2005 版本,它与以前发布的版本不同,建立 ITRF2005 时所用的资料是采用下列空间大地测量技术所获得的测站坐标(X,Y,Z)和地球自转参数 EOP 的时间序列。

由国际 GNSS 服务(IGS)提供的间隔为一星期的时间序列。

由国际激光测距服务(ILRS)提供的间隔为一星期的时间序列。

由国际 VLBI 服务(IVS)提供的间隔为一天的时间序列。

由国际 DORIS 服务(IDS)提供的间隔为一周的时间序列。

其中,前 3 种技术提供的是经统一处理后的最终综合解,而 IDS 提供的是各分析中心的解,需经统一处理后才能使用。