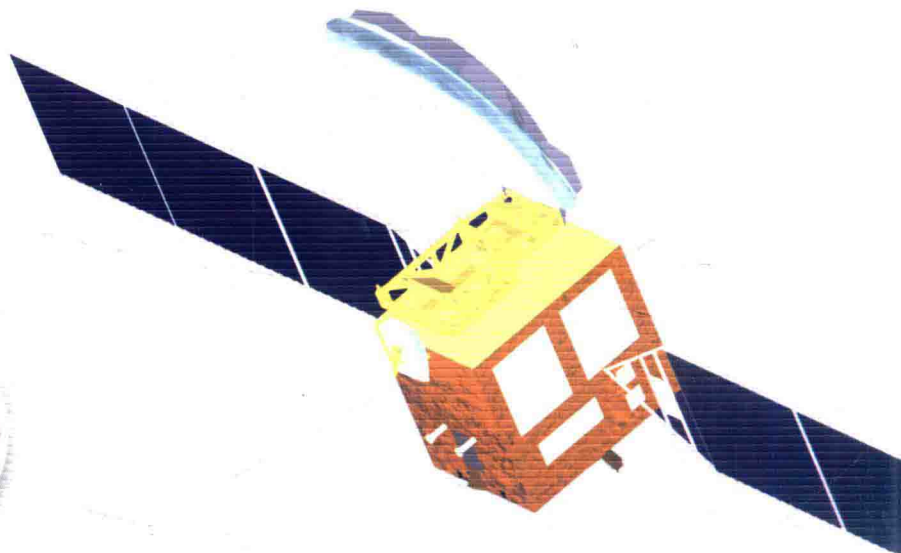




国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

北斗系统与应用出版工程
“十二五”国家重点图书出版规划项目
国家出版基金项目



卫星导航接收机

抗干扰技术

◎ 潘高峰 王李军 华 军 著

◎ 杨小牛 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

北斗系统与应用出版工程

“十二五”国家重点图书出版规划项目

国家出版基金项目

卫星导航接收机 抗干扰技术

潘高峰 王李军 华 军 著
杨小牛 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

随着我国北斗系统能力的形成，“北斗”接收机的抗干扰能力正在成为系统应用的核心问题之一。美国 GPS 现代化计划的核心也是抗干扰。抗干扰主要是抗人为干扰，其次才是抗非人为干扰。人为干扰可以是专门设计的，针对卫星导航接收体制和信息处理流程中的各个薄弱环节，干扰设计者不会局限于“最佳接收理论”约定的前提条件，而且人为干扰和抗干扰是相互博弈的，是一个过程。

本书介绍了美军现代化计划的实施过程，从原理上研究了接收机要面临的各种环境和干扰。卫星导航都采用直接序列扩频体制，本书作者根据自己的经验，分析了直扩体制的抗干扰潜能，介绍了通用的抗干扰技术以及卫星导航接收机可以采用的独特的抗干扰技术。卫星导航接收机可以发挥体系优势，极大地提高抗干扰能力，反过来干扰机也可以有体系要求、协同要求、战术使用方法要求。本书采用数字接收机的观点，进一步介绍了软件接收机。

本书可以作为卫星导航领域科技人员的参考用书，也可以作为相关专业学生的学习参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

卫星导航接收机抗干扰技术 / 潘高峰, 王李军, 华军著. —北京: 电子工业出版社, 2016.4
北斗系统与应用出版工程

ISBN 978-7-121-28520-2

I. ①卫… II. ①潘… ②王… ③华… III. ①卫星导航—导航接收机—抗干扰措施
IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 069432 号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 三河市兴达印务有限公司

装 订: 三河市兴达印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 19 字数: 416 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版

印 次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 78.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mariams@phei.com.cn。

北斗系统与应用出版工程

指导委员会

主任

孙家栋：中国科学院院士，两弹一星功勋奖章获得者

副主任

张履谦：中国工程院院士

刘经南：中国工程院院士

沈荣骏：中国工程院院士

杨元喜：中国科学院院士

杨小牛：中国工程院院士

谭述森：中国工程院院士，北斗卫星导航系统副总设计师

杨长风：北斗卫星导航系统总设计师

李祖洪：北斗卫星导航系统副总设计师

夏国洪：原中国航天科工集团公司总经理，党组书记，科技委主任

张荣久：中国卫星导航定位协会会长

委员（以下按姓氏汉语拼音排列）

敖然 陈少洋 刁石京 高晓滨 李忠宝 刘九如 柳其许 苗前军
冉承其 宋起柱 于春全 赵坚

编审委员会

主任

曹冲

副主任（以下按姓氏汉语拼音排列）

郭树人 景贵飞 李冬航 陆明泉 施闯 王传臣 王飞雪 王俊峰
王莉 魏永刚 夏青 肖雄兵 杨强文 郁文贤 张代平 赵丽松
周建华

委员（以下按姓氏汉语拼音排列）

鲍志雄 蔡毅 陈涤非 陈洪卿 陈向东 高玉平 韩云霞 何在民
华军 金永新 李变 李成钢 鲁郁 潘高峰 蒲小兵 施浒立
王李军 吴才聪 吴海涛 武建锋 夏建中 夏林元 熊立 姚铮
俞能杰 苑严伟 郑瑞锋

秘书组成员（以下按姓氏汉语拼音排列）

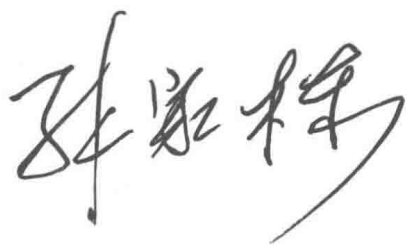
来春丽 宋梅

策划编辑

宋梅

总 序

“北斗系统与应用出版工程”丛书，能作为国家出版工程推进，是件很好的事情，我表示热烈的祝贺，欣然作序予以鼓励支持。北斗系统不仅是项充满活力的新兴技术，而且是国家重要的时空信息基础设施，同时由于它与其他技术和产业的多重关联性和融合性，故成为现代智能信息产业群体的重大技术支持系统和具有巨大带动力的时代产业发展引擎，与国家安全、国民经济和社会民生密切相关，与两个“中国梦”密切相关，能够服务全中国和全世界。北斗系统的建设和运营，给国家和社会的兴邦强国、行业和企业的光荣立业、团队和个人的著书立说与创新创业创造精神的大发挥、大发展，提供了百年难遇的良好机会。“北斗系统与应用出版工程”丛书，也承载着同样的使命，它所包括的内容包括系统、技术和应用三个方面，这种选择非常符合实际需要，很全面，且顾及了眼前和长远，而且应用方面所占的分量相当大。我建议在服务领域要多下点功夫，这是北斗系统和时空信息服务体系的关键。在当今的条件下，推进这个出版工程，具有明显的现实意义和长远价值。为此，我在这里要强调三点：一是一定要把国内外 GNSS 领域的成功经验和教训，进行系统总结，作为良好的参考；二是应该将我们在系统建设中的实践，上升为理论与模式，进一步推进我们的工作与事业；三是在上面两点的基础上，我们要有所前进，有所创造，在理论、实践、产业和体系化发展推进上有所突破，逐步走向世界的前列，真正把这一出版工程，做成北斗系统伟大工程的一个不可分割的组成部分，反过来对于系统工程发挥指导促进作用，发挥其 GNSS 里程碑效应和效能。



2015 年 12 月

前 言

卫星导航接收机已广泛应用于我们的日常生活当中，军事领域中的通信、指控、授时以及各种平台，包括汽车、飞机、大炮、舰船、卫星、导弹、炮弹等几乎没有不受卫星导航影响的领域。本书以北斗或 GPS 接收机为代表，讲述卫星导航接收机的抗干扰技术。

从美国提出导航战概念以来，“GPS 下一步的任务，除了抗干扰还是抗干扰和抗干扰”，抗干扰的重要性已成为业内共识。随着我国“北斗”系统能力的形成，“北斗”接收机的抗干扰能力也正在成为系统应用的核心问题之一。目前关于卫星导航接收机的大部分书籍，关注的重点是 GPS 接收机输出信息的应用，而不关心接收机本身。对于卫星导航的初级应用者来说，关注 GPS 接收机输出信息的应用就够了，但毕竟还有越来越多的人需要对卫星导航接收机特别是北斗接收机的抗干扰做深入的研究和应用，恰好作者是这样的一些人，并且已对卫星导航接收机的抗干扰技术关注和研究了十多年，也愿意与大家共同探讨思考过的问题，共享经历过的经验教训。

本书的总体编写思路分三个层次：

第一，卫星导航接收机的抗干扰要抗什么样的干扰？作者认为主要是抗人为干扰，其次才是非人为干扰（包括自然干扰和非故意的人为干扰）。本书把各种干扰因素和传播条件都看成接收机面临的“环境”，并进行了详细分析。正因为干扰是人为的，所以人为干扰可以是专门设计的，针对卫星导航接收体制、信息处理流程中的各个薄弱环节和导航定位过程，而不仅仅是针对卫星导航信号层面。这样的干扰是“自由的”，比非人为干扰要复杂得多，抗这样的干扰也困难得多，而且人为干扰和抗干扰是相互博弈的，是一个过程。本书将博弈分成战术使用博弈和技术博弈，并穿插介绍。

第二，各种卫星导航为什么不约而同都采用了直接序列扩频体制？这种体制对各种干扰如何发挥潜能？卫星导航接收机还可以采用哪些通用的抗干扰技术和独特的抗干扰技术？本书提供了作者自己的经验设计。

第三，卫星导航系统是一个复杂的体系，卫星导航接收机可以发挥系统属性，极大地提高抗干扰能力，反过来干扰机也可以有体系要求、协同要求、战术使用方法要求。对于卫星导航接收机而言，这部分内容非常重要，却也往往被忽视。为了简化起见，本书在描述各种技术时，通常采用直扩通信体制和卫星导航接收机的单通道，但会不断穿插提醒体系性质，并在最后一章进行了集中简要描述。

另外，因为抗干扰技术和设计都需要一个载体，依赖于具体的接收体制。本书采用了数字接收体制。目前各种接收机都趋向采用数字接收体制，需要抗干扰的接

收机尤其如此。而且,相对来说,卫星导航接收机属于窄带接收机,在现有条件下,很多技术功能可以进一步用软件方式来实现。本书简要描述了软件接收机模式。本书强调软件接收机模式还有一个重要原因,就是可以采用作者的导师杨小牛院士的成果和作者翻译的《GPS 软件接收机基础》一书的成果。在软件接收机中,信号被数字化后,可以通过数字信号处理得到必要的信息,也就是说,可以用软件进行信号和信息处理,这种方式对增强抗干扰能力非常有意义。而且,一旦很好地理解了软件无线电的概念,读者就能够自己提出一些解决问题的新方法,比如能够提高效率和其他捕获和跟踪方法,因为软件功能是可以由读者自己设计和重构的。

通信和导航是两个不同的学科,却又是两个紧密相关的学科,通信和导航的接收机尤其如此。卫星导航的对抗(干扰和抗干扰)技术研究刚起步不久,而通信对抗已具备相对成熟的理论和技术,本书借用了通信对抗中的许多概念和术语,并往往以通信对抗为基础进行分析,然后针对卫星导航接收机的特点再进行专门讨论。

需要提醒的是,在实际工作中,抗干扰研究与干扰研究的视角往往并不相同,使用的术语也不尽相同,究其原因,可能是接收机设计时有“最佳接收理论”,而干扰自有其“最佳干扰理论”,人为干扰是自由的,干扰设计者不会局限于“最佳接收理论”约定的前提条件。信息论是信息传输的基础理论,是干扰与抗干扰设计者的通用语言,本书采用信息论对干扰的基础理论进行分析,作者认为,抗干扰设计只需了解各种干扰可能的原理,而没有必要了解干扰产生过程。

本书各章节的安排请参考 1.3 节。

本书由潘高峰具体负责第 1~6 章和第 11 章的撰写,并负责全书统稿工作;王李军负责第 8~10 章的撰写;华军负责第 7 章的撰写。另外,张建强研究员提供了大量数据和分析;2.3 节中使用了英年早逝的曹国英女士提供的资料。在本书的成稿过程中,金晓帆和高腾协助了全书统稿和部分编写工作,陈伟峰负责全书的校对。我们很荣幸地得到了杨小牛院士的支持,他不仅担任了全书的审查工作,还就全书各个部分的具体编写进行了指导。杨小牛院士是国内软件无线电技术的开拓者和引领者,杨小牛院士也是王李军的博士后导师,本书的研究成果包含了他的智慧,并且许多地方直接引用了杨小牛院士有关书籍中的内容。另外,在本书的编写过程中还得到作者所在单位和众多相关课题组同事,以及本书策划编辑宋梅的大力支持和帮助,作者在此一并感谢。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星导航简引	3
1.2 接收机抗干扰需求和发展	7
1.2.1 弱信号	7
1.2.2 人为干扰	8
1.2.3 接收机数字化、软件化及其体系结构	8
1.2.4 接收机的实际使用环境	8
1.2.5 接收机的系统和体系属性	9
1.3 本书结构和适用范围	9
第 2 章 卫星导航及其现代化概论	11
2.1 卫星导航定位原理简介	12
2.2 卫星导航定位系统简介	18
2.2.1 北斗卫星导航定位系统 (BDS) 简介	18
2.2.2 其他卫星导航定位系统简介	22
2.3 卫星导航系统抗干扰技术的发展	28
2.3.1 系统抗干扰技术的起源	29
2.3.2 美军的系统抗干扰技术计划	29
2.3.3 GPS 现代化计划	34
2.3.4 GPS 新信号结构推出过程	36
2.3.5 GPS BlockIII 计划	51
第 3 章 卫星导航软件接收机	53
3.1 采用软件接收体制的优势	54
3.1.1 采用软件接收体制的技术优势	54
3.1.2 采用软件接收体制的独特抗干扰优势	54
3.1.3 采用软件接收体制的发展优势	56
3.2 软件接收原理简介	57
3.2.1 软件接收机组成简介	57
3.2.2 软件接收机设计思想简介	58
3.3 软件接收机技术简介	60
3.3.1 卫星导航软件接收机结构选择	61

3.3.2	卫星导航软件接收机的模拟前端	64
3.3.3	卫星导航信号的数字化	69
3.3.4	卫星导航软件接收机的数字信号处理	69
第4章	非人为干扰环境	73
4.1	卫星导航信息传递信道和信道模型	74
4.2	卫星导航信息传递信道中的非人为干扰	76
4.3	载体动态的影响	77
4.3.1	卫星多普勒频移	77
4.3.2	多普勒频率的变化	80
4.4	环境多径及对接收机跟踪环路的影响	82
4.4.1	卫星导航信号多径误差模型	82
4.4.2	多径对接收环路的影响	83
4.4.3	对多径效应的讨论	85
4.5	载体遮蔽的影响	86
4.5.1	信号方向与用户航向及水平面夹角影响的讨论	87
4.5.2	信号方向与用户之间的角度影响的仿真	88
4.6	陆地的影响	115
4.6.1	菲涅尔区的讨论	115
4.6.2	开阔面陆地对卫星导航信号的影响	121
4.6.3	陆地部分遮挡对卫星导航信号的影响	127
第5章	电子战环境	131
5.1	最佳干扰和绝对最佳干扰	132
5.1.1	卫星导航信息传递中平均互信息量的描述	132
5.1.2	干扰最大熵	135
5.1.3	绝对最佳干扰样式	140
5.1.4	几种常见压制干扰样式危害性的讨论	140
5.1.5	干扰影响的不确定性讨论	144
5.2	相关干扰	146
5.2.1	相关干扰原理	146
5.2.2	相关干扰的物理描述	147
5.2.3	相关干扰危害评估	148
5.3	灵巧干扰	149
5.3.1	灵巧干扰定义	150
5.3.2	多普勒时移	151

5.3.3	对接收机环路的危害	151
5.3.4	一个实例	153
5.4	欺骗干扰	156
5.4.1	欺骗干扰的危害性	156
5.4.2	欺骗干扰的原理	157
5.4.3	对捕获跟踪环路的干扰实验	161
5.4.4	转发欺骗干扰的限制	162
第 6 章	直接序列扩频抗干扰技术	165
6.1	直接序列扩频接收机处理增益原理	166
6.2	环路同步技术的讨论	168
6.3	直扩抗噪声容限	170
6.3.1	抗噪声容限的理论分析	171
6.3.2	抗噪声容限的数值分析和设计	174
6.4	多模信号处理	178
第 7 章	自适应天线阵列抗干扰技术	181
7.1	自适应调零天线抗干扰技术	185
7.1.1	基本概念	185
7.1.2	调零天线的抗干扰自由度	190
7.1.3	GPS 调零天线的算法	192
7.1.4	GPS 调零天线的特点	200
7.1.5	GPS 调零天线的性能	202
7.2	多波束接收技术	208
7.2.1	阵列信号模型	208
7.2.2	MVDR 波束形成算法	209
7.2.3	仿真分析	210
第 8 章	信号处理抗干扰技术	213
8.1	时频域抗干扰原理	214
8.2	时频域抗干扰算法	215
8.2.1	自适应时域滤波	215
8.2.2	频域 FFT	216
8.2.3	空时 (STAP) 抗干扰	218
8.2.4	其他算法	224
8.3	抗干扰性能分析	234
8.3.1	瞬时相位存在估计误差时的性能分析	234

8.3.2	瞬时幅度存在估计误差时的性能分析	240
8.3.3	仿真分析	242
第 9 章	GPS/INS 组合导航技术	247
9.1	GPS/INS 组合导航原理	249
9.2	组合导航技术	250
9.2.1	GPS/INS 松耦合技术	250
9.2.2	GPS/INS 紧耦合技术	256
9.2.3	GPS/INS 深耦合技术	258
9.3	GPS/INS 组合系统的性能	259
9.3.1	GPS/INS 组合导航接收机测量误差与跟踪门限的关系	259
9.3.2	GPS/INS 组合导航的多普勒频移误差估计	260
9.3.3	GPS/INS 组合导航接收机的抗干扰性能分析	261
第 10 章	其他抗干扰技术	263
10.1	干扰信号监测识别技术	264
10.1.1	干扰监测技术研究现状	264
10.1.2	干扰监测关键技术分析	265
10.2	干扰源测向定位技术	270
10.2.1	干扰源测向技术	270
10.2.2	干扰源定位技术	271
10.3	完好性检测	272
10.3.1	完好性检测算法	273
10.3.2	故障卫星探测算法 ^[73]	275
10.3.3	故障卫星分离算法 ^[73]	276
第 11 章	卫星导航接收机实际使用中的抗干扰	279
11.1	实际使用方式对抗干扰能力的影响	280
11.2	卫星导航接收机的系统属性	280
11.2.1	现在性	280
11.2.2	体系性	280
11.2.3	系统多样性	281
11.2.4	用户多样性	281
11.3	干扰机的体系要求	281
11.4	干扰方式预测	281
11.4.1	体制针对性	281
11.4.2	核心观测值针对性	282

11.4.3	效果评估针对性	282
11.5	干扰机的分布预计	282
11.5.1	干扰方程	282
11.5.2	距离增益	283
11.5.3	升空干扰增益	283
11.5.4	分布干扰增益	283
11.5.5	干扰机的协同	283
11.6	展望	284
	参考文献	285

第1章

绪 论

本章要点

- 卫星导航简引
- 接收机抗干扰需求和发展
- 本书结构和适用范围



随着各个卫星导航系统能力的形成，卫星导航接收机的抗干扰能力问题无一例外地正在成为各系统应用的核心问题之一。本书讨论的卫星导航接收机抗干扰技术适用于所有卫星导航系统，但具体的技术探讨和应用举例则采用北斗和 GPS，毕竟 GPS 的技术和应用是最成熟的，而作者对北斗相对熟悉。

在正式讨论主题之前，请允许我讲一个故事。近几年来，每提到 GPS，我总要讲起这个故事，一个与 GPS 的抗干扰有关的故事。

海湾战争以后，GPS 出尽风头，但是，对 GPS 的过分依赖也使美国对 GPS 的安全性能越来越感到担心：如果 GPS 被干扰掉了，靠不住了，这仗怎么打？一些欧洲防务团体对过度依赖 GPS 系统也持审慎态度。德国电子防务公司的一位成员将 GPS 比作德国民间文学中传说的女妖，这个莱茵河的女妖用其美妙的歌声迷惑航行者，将他们引向礁石。

女妖是美丽的，不小心的话是有危险的。

女妖是诱人的，作者很想去莱茵河看看。

本来 2003 年春天可以成行，不巧赶上 SARS（非典病毒）肆虐（抛开感情因素，SARS 倒是有点像 GPS，单个的个体并不强壮，而一旦和组织体结合在一起，却很难对付），所以我们的行程一直拖到了当年 10 月份。我们的学习班每周日都会组织到德国各地或邻近国家参观。这天是 11 月 6 日，我们先去了科隆，然后去波恩方向。天有点小雨，车子在一阵一阵的白雾中穿行，风景很美，但认路有些困难。都是 GPS 导航仪惹的祸，把我们带到了河边一条断头路，敦厚的德国老司机忍不住嘲笑说，相信 GPS 会把车开进河里。我们的导游也没有起到作用，充当临时导游的是我们的一个教员——老孔。老孔博士毕业后留在德国，很风趣，很愿意说话，但也有些不负责任，竟然事先不知道要去莱茵河！

因为走了弯路，耽误了些时间，到达莱茵河时已近黄昏。

我们停留在一个河湾，两岸是曲线优美的小山，深秋季节已是层林尽染，平静清澈的河面上偶尔有游船驶过，一阵薄雾飘来，画卷轻纱半掩。

美丽的莱茵河！

我问老孔，女妖在哪里，我要去看女妖，老孔不知道，但照顾到我失望的情绪，好不容易找来了一位当地老人。老人说就在这里，天气好的时候，她会坐在对面馒头形的小山上梳头唱歌……不过老人家严肃地纠正，她不是女妖而是女神！

噢，是这样？但是，但是还有传说中湍急的水流呢？巨石、漩涡呢？痴情的渔夫呢？

回来的路上，我浑浑噩噩，同样是德国人，怎么说的不一样呢？活泼的老孔博士，显然在游玩之际，搞清了一些问题，此时唱起了一段优美的德国歌曲，据说大意是：

莱茵河的女儿罗蕾莱（Lorelei），住在莱茵河中的一座巨石上。她是一位绝色的金发美女，更有着举世无双的美妙歌喉。

每当她坐在河畔的巨石上，梳理自己的金色头发，并且唱着动听的歌谣时，所有听到她歌声的船夫都会立刻爱上她。情之深，爱之切，使得船夫们忘记了注意身边湍急的莱茵河。在罗蕾莱所在巨石的下游，有危险的漩涡和尖棱的石头。被罗蕾莱深深吸引的船夫们无心理会这些，结果船身被撞破，葬身河底。

不知是老孔唱得好，旋律优美，还是故事动人，车上响起了热烈的掌声和欢呼声，令老司机都连连称好。老孔“导航”的水平不高，却还是多才多艺。

作者也好像渐渐明白起来。

先前导航仪发生问题，不一定是GPS的错，可能是电子地图不好，可能是接收机设计得不好，可能是受到了干扰。就像是罗蕾莱，罗蕾莱在莱茵河边梳头唱歌又有什么错？美丽的莱茵河，阳光灿然的日子！不但没错，而且十分令人期待。作者以为，可能是仰慕的人称罗蕾莱为女神，翻了船的……更何况莱茵河上可能已经修起了水库，不见了激流险滩？如今这样平静清澈的河面，足可以“抗干扰”。

看来，到底是女妖还是女神，还是“见仁见智”的事！

1.1 卫星导航简引

导航是一个相对“现代”的概念，有了“航行”才需要“引导”。现代汉语词典中解释导航为“利用航行标志、雷达、无线电等装置引导飞机或轮船等航行”，卫星导航系统就是利用人造卫星引导航行。要导航先需要“定位”，核心问题是要知道“现在，我在那里”，这个问题也是我们抗干扰接收机需要考虑的关键问题。

可能因为是导航先需要“定位”，所以美国的卫星导航系统名叫全球定位系统（Global Positioning System, GPS），就是这么现实。中国的卫星导航系统比较有文化内涵，命名为“北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）”。BDS是中国自行研制的全球卫星导航系统，其名称也非“北斗”莫属，古代中国人，特别是汉人，很早就利用北斗来辨别方向，确定季节，比较有经验的人还可以根据北斗推算时辰。

古时候既没有雾霾，也没有光污染，星空美丽灿烂，因为她的深邃，还显得那么神秘。可能是大气层的干扰，星星时常会忽闪忽闪的，被人想象成大眼睛一眨一眨的，似乎想要告诉你一点什么。灿烂星空中最耀眼的就是北斗星座，她也确实告诉了古人们许多信息。如果你相信神仙（当然，古人大多信神），还能从中读出无限的“天机”。

北斗星座在北部星空，由七颗星星组成，如图 1-1 所示。在西方人看来北斗七星属大熊座的一部分，位于大熊的尾巴上。

北斗的这个形状像不像一把带着长长把柄的勺子？只不过它是方斗形的，巧的是古代汉族人民舀酒的勺子就是斗形的。从口子上第一颗星起，到手柄的尾端，古人顺序给北斗的这七颗星取了七个好听又略带神秘的名字，分别称为天枢、天璇、

天玑、天权、玉衡、开阳、摇光。其中天枢、天璇、天玑、天权四颗星组成为盛酒的方形斗身，有一个专门名字，叫“魁”；另外三颗星星玉衡、开阳、摇光组成为手把，即斗柄，也有一个专门名字，称“杓”。北斗星在不同的季节和夜晚不同的时间，出现于天空不同的方位，手柄的指向和方形斗身开口的朝向也会变化。

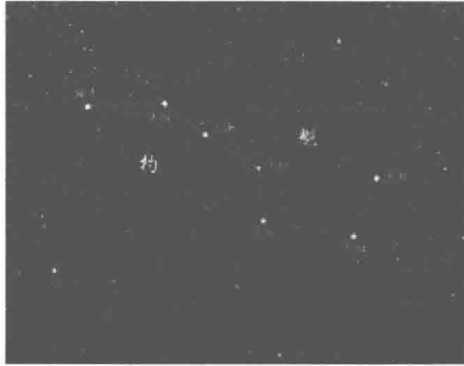


图 1-1 北斗星座图

要利用北斗来辨别方向，最好再来了解一颗特殊的星星：北极星。在北斗七星方形斗身外侧的两颗星（天枢、天璇）连接线上，朝斗口方向延长约五倍距离，即可找到相对北斗暗一点的北极星，参见图 1-2。北极星的“星下点”就是北极附近，也就是说北极星几乎正对着地球自转轴，从地球北半部看到的北极星是“永远不动”的“定点”星。随着地球的自转，看起来所有的星星包括北斗都在绕着北极星旋转，因此北斗斗身外侧的两颗星（天枢、天璇）的连线始终对着北极星，所以斗口就始终朝着北方。据此，人们就可以确定方位了：面对北极星或北斗斗口的方向就是北方，背面是南方，左面西而右面东。可能受此影响，以后的地图制作和方位标示也一直遵循“上北下南、左西右东”的原则。

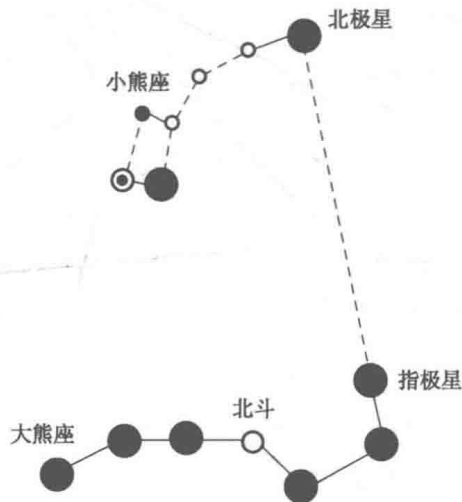


图 1-2 北斗七星与北极星位置图

北斗和北极星的组合也可以用来推断时间，因为天枢、天璇和北极星连线是以北极星为中心旋转的，把该连线作为指针，星空作为表盘，看时间就跟看手表差不多了，只不过这个星空表跟我们手表的指针转动方向是相反的。但有一个比较不方便的是，每天在每个经度看到的时间刻度是不一样的，对古人来说这就需要经验。还好，古人的活动范围不大，星空表虽然每天不一样，却也像大海潮水一样，变化是随日期、季节循序而有“潮信”的，推算大致时辰还不算太麻烦。北斗也能指示季节，古人是根据初昏时北斗手柄所指的方向来决定季节的：“斗柄指东，天下皆春；斗柄指南，天下皆夏；斗柄指西，天下皆秋；斗柄指北，天下皆冬”，图 1-3 说明了上述“星象”。

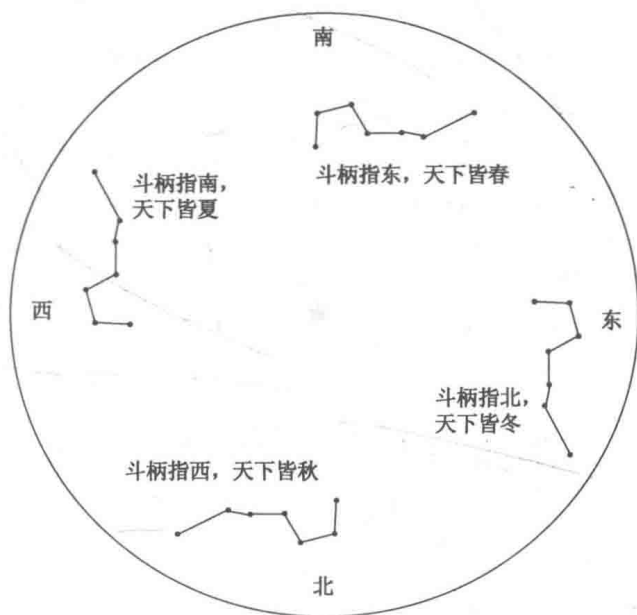


图 1-3 北斗七星与季节变化图

到此可以明白，北斗星座是通过自身在星空画画作图，来给我们指示方位和时辰的。当然，“鉴赏”这幅“北斗星座图”需要一定的知识和经验，还需要合适的气候、地理环境。特别要提示的是，由于星座在运动，图 1-3 中“照相”的时间是有讲究的，不仅和季节有关，而且要在每天“初昏”时，要等到“月上柳梢头”。

清楚了利用北斗星座进行“导航”的原理，对理解现代卫星导航原理有什么帮助呢？毕竟现代卫星导航系统是看不见摸不着的东西，通过相互比较可以有一个形象的认识。现代卫星导航原理当然建立在现代天体运行认知和现代通信导航理论之上（参见 2.1 节），但卫星导航接收机在确定了自身所处的“环境”，得到所需的星座的“鉴赏知识经验”后，卫星导航接收机也有几分像是一个“立体高像素数字照相机”。

从“环境”上说，古代北斗的地位首先来自于其“站得高”、形象固定且又大又明显，现代卫星导航星座继承了这个特点。但北斗毕竟“站得太高”，和“站得