



装备科技译著出版基金



科工精译
导航与定位系列

全球卫星导航系统天线

Antennas for Global Navigation Satellite Systems

【英】陈晓东 (Xiaodong Chen)

克莱夫·G·帕里尼 (Clive G. Parini)

布莱恩·柯林斯 (Brian Collins)

著

【中】姚远 (Yuan Yao)

【巴】马苏德·乌尔·拉赫曼 (Masood Ur Rehman)

赵修斌 徐小杰

庞春雷 余永林

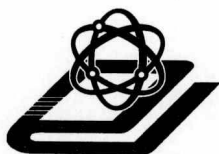
译

- 内容新颖，热点与难点相结合，首本全球卫星导航系统天线专业著作
- 理论精辟，原理与仿真相结合，深入揭示全球卫星导航系统天线原理
- 实践主导，案例与工程相结合，全面覆盖全球卫星导航系统天线应用

WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

全球卫星导航系统天线

Antennas for Global Navigation Satellite Systems

[英] 陈晓东

克莱夫·G·帕里尼

布莱恩·柯林斯

著

[中] 姚远

[巴] 马苏德·乌尔·拉赫曼

赵修斌 徐小杰

庞春雷 余永林

译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2013-203 号

图书在版编目 (CIP) 数据

全球卫星导航系统天线/ (英) 陈晓东等著; 赵修斌, 徐小杰译.

—北京: 国防工业出版社, 2015.8

(科工精译)

书名原文: Antennas for Global Navigation Satellite Systems

ISBN 978-7-118-10074-7

I. ①全… II. ①陈… ②赵… ③徐… III. ①卫星导航—导航天线 IV. ①TN967.1 ②TN965.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 191237 号

Antennas for Global Navigation Satellite Systems by Xiaodong Chen, Clive G. Parini, Brian Cllins, Yuan Yao and Masood Ur Rehman

ISBN: 978-1119993674

Copyright ©2012 John Wiley & Sons, Inc.

This translation published under John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

All rights reserved.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10½ 字数 219 千字

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

人类关于“我在何处？路在何方？现在几时？”这个问题的探究，渊源已久，从古人夜观天象、北斗领航、六分仪、天文跟踪器，到无线电导航、惯性导航，再到目前的卫星导航定位，每一次技术革新都带来人类的进步和产业的变革。目前，全球卫星导航系统（GNSS）已广泛应用于各种生产、生活和军事活动中，据不完全统计，全球卫星导航定位系统的应用已经超过 1000 种，其应用前景达到了只受限于人们想象力的境地，并对人类军事活动、生产和生活活动产生了深刻影响。当今社会，卫星导航已成为经济社会发展的强大推进器和一个国家重要的基础设施。

《全球卫星导航系统天线》一书围绕卫星导航系统最重要的组成部分——天线，开展探讨和研究，从天线设计和应用的无线电波传播基础出发，覆盖了从航天器到便携式终端等各个应用环境的天线设计方法和具体应用案例，同时还对影响天线性能的各种环境因素如多径效应等进行了详尽的探讨和描述，涵盖了卫星导航系统天线设计和应用的方方面面，洋洋洒洒，蔚为大观。

本书是全球第一本真正意义上全面介绍卫星导航系统天线的专著，著者均为卫星导航系统和天线方面的专家和学者。本书内容理论详尽、案例精辟，既可作为我国高校导航定位相关专业的教材用书，也是广大卫星导航系统天线研究人员和爱好者不可或缺的一本参考书籍。目前我国在高端卫星导航系统天线方面存在着研究力度不足和人才短缺的问题，希望此书的翻译出版能够为我国卫星导航系统天线技术的发展聊尽微薄之力。

全书由空军工程大学信息与导航学院赵修斌教授统筹协调翻译。其中，赵修斌教授负责全书的统筹和校对工作，并主译了第 1~3 章；徐小杰博士主译了第 4、5 章；庞春雷博士主译了第 6、7 章；余永林副教授主译了第 8 章。此外，博士研究生龚昂、王啸、段荣、王勇及硕士研究生伍劭实、徐轲、张闯等人在文字校对等方面做了大量的工作。“嚶其鸣矣，求其友声”，由于时间和译者水平等原因，本书的翻译还存在一定的不足，希望广大读者不吝赐教。

译者

2015 年 5 月

前 言

全球卫星导航系统 (GNSS)，连同互联网和移动通信一起成为当今社会又一支柱技术。GNSS提供一系列的服务，如导航、定位、公共安全和监控，地理测量、时间标准、绘图、天气和大气信息。全球卫星导航系统的应用已经几乎无处不在，以满足不断增长的便携式个人导航设备 (PND) 的导航设施需求。移动设备包括集成的全球卫星导航系统的智能手机的销售，从2006年的109万台增长到2012年的444万台，这一领域的产业仅次于手机产业。导航产业预计在2014年赚取1300亿美元的总额。全球卫星导航系统应用的目前发展和未来预期增长要求比以前部署的天线更具可用性的先进终端天线。

天线是GNSS设备上最重要的组成部分。由于不同GNSS服务在同一平台上的整合、设备的小型化以及用户和当地环境所造成的性能下降，全球卫星导航系统天线变得日渐复杂。应充分考虑这些因素，并寻求适当的解决方案，以开发高效的导航设备。作者在过去十年中一直从事这一领域的研究，并且掌握GNSS天线研究的大量信息。因此，有必要开展本书的编写工作，拟在GNSS天线技术方面填补知识空白。本书侧重于GNSS天线的理论和设计实践。本书中讨论GNSS天线的各个方面，包括GNSS的基本原理和圆极化天线、GNSS终端天线和星载天线的设计方法、用于这种天线的性能增强技术以及用户和周围环境对这些天线的影 响，从技术和应用的观点给出了GNSS天线设计中许多具有挑战性问题的解决方案。

全书共分8章。第1章介绍了全球卫星导航系统的概念，描绘了从第二次世界大战中的台卡陆基导航系统开始，直到美国 (GPS)、欧洲 (GLONASS 和 Galileo) 和中国 (北斗) 正在使用的最新系统的历史；阐述了处理导航时延的基本原则，描述了美国导航星全球定位系统的运行过程；阐述了 GPS 的增强应用，其用途包括作为时间基准和作为其微分形式的准确测量工具。

第2章介绍了无线电波在全球导航卫星系统的卫星和地面接收器之间的转播和圆极化 (CP) 波选择依据。它还介绍了相关传播问题，如多径干扰、射频干扰、大气效应等。通过介绍圆极化天线设计的基本方法，突出了 GNSS 天线设计中的根本问题。

第3章概括了航天器的 GNSS 天线的要求，说明了导航星全球定位系统、GPS 和伽利略的典型部署体制类型；讨论了航天器天线的各种不同的特殊性能要求和测试，如无源互调 (PIM) 测试和倍增效应。

第4章着重于便携式终端的 GNSS 天线的规格、技术挑战、设计方法和实际

设计。介绍了现有 GNSS 中，终端天线的各种固有的类型，包括微带螺旋、螺旋和陶瓷天线。

第 5 章专注于集成 GNSS 接收机的多模天线。介绍了三种多模 GNSS 天线，即双频、三频以及宽带天线；讨论了实用和新颖的天线设计，如多层微带天线和耦合馈电缝隙天线；还涵盖了差分 GPS 系统的高精度终端天线，包括相位中心的测量和稳定。

第 6 章讨论了多径环境对移动终端的 GNSS 天线性能的影响。突出了定义环境因素的统计模型在 GNSS 天线性能评价的重要性，并提出了这样一个模型。然后利用该模型，提出了一个对各类在实际工作中的移动终端的 GNSS 天线进行详细分析的方法。最后，描述了如何通过采用波束形成、天线分集、A-GPS 和 ESTI 标准化再放射技术对恶劣环境下的终端天线进行性能增强。

第 7 章涉及的用户存在对 GNSS 天线的影 响，给出了对不同的天线人体分离，天线在人身上不同的位置和不同的人体姿态等情况下的性能的可靠性详细信息。此外，还考虑到均匀和非均匀人体模型对附近的 GNSS 天线的影 响。最后，本章使用统计建模的方法，并考虑到不同人体的情况，讨论分析了这些天线在整个多径环境下靠近人体工作时的性能。

第 8 章介绍了当 GNSS 功能被添加到小型设备如手机和个人跟踪器，对天线的尺寸和形状形成的限制。本章展示了天线的辐射模式和偏振特性可以被一些因素彻底改变，例如天线在平台中的位置。高灵敏度接收机系统的出现对平台可容许的噪声提出了严格的限制，这些噪声可能由平台上的其他设备产生而不损害 GPS 接收器的灵敏度。本章给出了将这些噪声减少至可接受的水平所必须采取的步骤。本章案例研究包含了大量移动终端天线，如小型背射螺旋天线、圆极化微带天线和各种微带天线。

这是第一本广泛而深入地介绍 GNSS 天线的专业用书。本书的组织形式对天线设计人员很实用，尤其对需要将他们的技能应用到 GNSS 系统上的人员，对那些不熟悉这部分主题的研究人员和学生来说，这是一本很有实用价值的专业用书。

目 录

第 1 章 全球卫星导航系统基础	1
1.1 全球卫星导航系统的历史	1
1.2 全球卫星导航系统的基本原理	2
1.2.1 基于时间的无线电导航	2
1.2.2 基于时间的三维导航系统	4
1.3 GPS 的操作过程	6
1.4 差分 GPS 的应用	12
参考文献	14
第 2 章 GNSS 天线的基本注意事项	15
2.1 GNSS 无线电波传播	15
2.1.1 平面波和极化	15
2.1.2 GNSS 无线电波的传播和影响	16
2.1.3 为什么全球卫星导航系统使用 CP 波?	18
2.2 天线设计基础	19
2.2.1 天线的基本参数	19
2.2.2 LP 天线设计与范例	21
2.3 CP 天线设计	22
2.3.1 CP 天线的基本原理和类型	22
2.3.2 简单的 CP 天线设计实例	25
2.3.3 GNSS 天线设计技术挑战	27
参考文献	29
第 3 章 全球卫星导航系统卫星天线	30
3.1 导航天线要求	30
3.2 天线配置类型	31
3.3 飞行器天线设计特点	37
3.3.1 无源互调效应	37
3.3.2 倍增效应	38

参考文献	38
第 4 章 GNSS 终端天线	39
4.1 微带天线在 GNSS 终端的应用	39
4.1.1 单馈电微带 GNSS 天线	39
4.1.2 双重馈电微带 GNSS 天线	43
4.1.3 陶瓷基底设计	45
4.2 螺旋天线	48
4.2.1 螺旋天线	48
4.2.2 螺线天线	50
4.3 GNSS 终端天线 PIFA 设计	52
参考文献	56
第 5 章 现代多模终端天线	58
5.1 多频带终端天线	58
5.1.1 多频段微带 GNSS 天线	58
5.1.2 多频 GNSS 螺旋天线	65
5.2 宽带 CP 终端天线	68
5.2.1 宽带微带天线阵	69
5.2.2 基于螺旋模式微带天线技术的高性能通用 GNSS 天线	70
5.2.3 宽带 CP 混合介质谐振器天线	70
5.2.4 用于多模 GNSS 的多馈电微带贴片天线	73
5.3 高精度 GNSS 终端天线	75
参考文献	80
第 6 章 复杂环境中的终端天线	81
6.1 GNSS 天线和多路径环境	81
6.2 多路径环境 GNSS 操作的统计建模	82
6.2.1 GPS 平均有效增益 (MEG_{GPS})	83
6.2.2 GPS 到达角分布 (AoA_{GPS})	84
6.2.3 GPS 覆盖效率 (η_c)	85
6.3 开阔环境试验过程	87
6.3.1 GPS 平均有效增益测量	87
6.3.2 GPS 覆盖效率的测量	87
6.3.3 测量装置	87
6.4 多路径环境中 GNSS 移动终端天线的性能评估	88
6.4.1 测试 GPS 天线的设计	89

6.4.2	仿真和量测 3D 辐射方向图的对比	95
6.4.3	量测的 3D 辐射方向图 and 实际现场测试的对比	96
6.5	对 GNSS 天线朝向的性能依赖	98
6.6	恶劣环境中 GNSS 移动终端天线的性能增强	103
6.6.1	辅助 GPS	104
6.6.2	GPS 信号转发	104
6.6.3	波束形成	104
6.6.4	分集天线	104
	参考文献	109
第 7 章	用户对 GNSS 天线的影响	111
7.1	人体和 GNSS 天线的相互作用	111
7.2	复杂环境中人体对 GNSS 移动终端天线的影响	111
7.2.1	GPS 测试天线的设计	112
7.2.2	人体的手和头对天线的影响	114
7.2.3	完整人体对天线的影响	122
	参考文献	131
第 8 章	移动终端 GNSS 天线	133
8.1	引言	133
8.2	天线特性参数	134
8.2.1	极化	134
8.2.2	辐射方向图	135
8.2.3	阻抗	136
8.2.4	增益/效率	136
8.2.5	重量	137
8.2.6	带宽	137
8.2.7	相位性能	137
8.3	GNSS 终端的分类	138
8.3.1	测绘型终端	138
8.3.2	移动型终端	138
8.3.3	通用移动终端	138
8.4	便携式用户设备的天线设计	139
8.4.1	短四臂螺旋天线	139
8.4.2	贴片天线	140
8.4.3	更小的天线	141
8.5	平台的功能	141

8.5.1	天线效率、增益和噪声	141
8.6	用户设备上天线的性能比较	142
8.6.1	跑车实验	142
8.6.2	与天线无关的性能表现	143
8.7	实际设计	144
8.7.1	GNSS 天线放置到应用平台上	144
8.7.2	产品评估	146
8.8	实例分析	146
8.8.1	测量系统	147
8.8.2	案例 1: 小 PCB 面板上改进的 PIFA	148
8.8.3	案例 2: 小型 PCB 板上沿的折线偶极子天线	148
8.8.4	案例 3: 类智能手机设备 LCD 显示器上改进的 PIFA	149
8.8.5	案例 4: 将改进的 PIFA 从 PCB 的一个角移动到相邻角	149
8.8.6	案例 5 和案例 6: 平台电噪声的影响	150
8.9	结语	151
	参考文献	151
附录 A 从 CDMA 信号中解码信息的基本原则		152
附录 B 天线相位特性和相位中心稳定性评价		154
B.1	相位中心的稳定性评价	154
B.2	确定平均相位中心	155
	参考文献	156

第 1 章 全球卫星导航系统基础

1.1 全球卫星导航系统的历史

全球卫星导航系统是在迪卡和罗兰等地基导航系统基础上产生的，其早期的系统在第二次世界大战中就已经得到应用。首个卫星导航系统由美国军方在 Transit, Timation 和随后的 NAVSTAR 试验项目发展而来的，这些项目采用的基本技术一直沿用至今。第一颗 NAVSTAR 卫星发射于 1989 年；第 24 颗发射于 1994 年，并于 1995 年 4 月将其全部操作性能完全公布。NAVSTAR 既提供民用服务又提供军用服务（具有较高精度），直到今天仍是如此。这个系统正在不断发展，在这个过程中会有更多的卫星采用更多的信号频率，同时提高精度（见 1.3 节）。

苏联在 1976 年发展了类似的系统，即格洛纳斯（全球卫星导航系统），它由 24 颗卫星组成，1995 年实现全面运行^[1]。格洛纳斯的绕地轨道由三个轨道平面组成，轨道高度为 19100km，相比之下，NAVSTAR 轨道高度为 20183km。格洛纳斯系统建成后，却由于苏联经济的衰退而陷入失修状态，随着俄罗斯致力于重建这一系统，2003 年，该系统得到了恢复。2010 年，由 20 颗卫星组成的星座覆盖了俄罗斯全境，其目标是在 2012 年实现全球覆盖。

欧盟和欧洲航天局的伽利略系统由 26 颗中高度地球轨道（MEO）卫星组成，卫星分布在 3 个轨道平面上，轨道高度为 23222km。这一系统采用双频率信号，其目标是提供优于 1m 的定位精度，计划在 2014 年全面投入运行，但根据目前（2010 年底）预算，到 2014 年只能有 18 颗卫星投入使用（60% 的容量）。

“北斗”是一个由中国独立开发的区域和全球导航系统，其卫星星座由 5 颗地球静止轨道（GEO）卫星和 30 颗距地球表面 21150km 的中高度地球轨道（MEO）卫星组成。它计划到 2012 年为亚太地区的客户提供服务，并于 2020 年覆盖全球。

准天顶卫星系统（QZSS）是一个日本的区域卫星系统，要求任意时刻均能在日本的准天顶附近观察到至少一颗卫星。该系统采用三颗卫星，在椭圆倾斜地球静止轨道（高度 42164km）上运行，卫星间夹角 120° ，经过相同的地面轨迹。其目的是与 GPS 和 Galileo 组合，以改善在城市中心（即所谓的“城市峡谷”）以及山区地区的服务。同时，在 95% 可置信度条件下达到 1.6m 的位置精度，预计 2013 年实现全面运行。

将来可能会有更多这样的系统，能为用户提供兼容互操作，以提高用户的定位精度。已经证实，通过 GPS 和 Galileo 两个系统的组合，定位性能可获得潜在提

高，这是由于组合的卫星星座比各自单独的星座有更好的几何布局^[2]。这种组合的卫星星座降低了获得高精度的代价（见 1.3 节），同时提供了一个更好的位置估算结果。2011 年第一季度统计的各系统概要如表 1.1 所示。

表 1.1 2011 年截至已经运行的全球导航定位系统汇总

GNSS	GPS/NAVSTAR	GLONASS	Galileo	Compass	QZSS
可使用情况	可使用	可使用	2014 年（14 颗卫星）	2012 年区域 2020 年全球	2013 年
星座	24 颗 MEO	24 颗 MEO	27 颗 MEO	5 颗 GEO+30 颗 MEO	3 颗高倾斜椭圆轨道卫星
轨道高度/km	20183	19100	23222	21150+GEO	42164
覆盖区域	全球	区域（俄罗斯） 然后全球	全球	区域（亚太地区） 然后全球	区域（东亚和 大洋洲） 补充 GPS
定位精度（民用）	7.1m 95%	7.5m 95%	4m（双频）	10m	1.6m 95%
用户频段 /MHz	L1=1575.42 L2=1227.6 L5=1176.45	G1=1602.0 G2=1246.0 G3=1204.704	E1=1575.42 E6=1278.75 E5=1191.795 E5a=1176.45 E5b=1207.14	B1=1561.098 B2=1207.14 B3=1268.52	L1 L2 L5
用户编码和调制方式	CDMA BPSK	FDMA BPSK+GLONASS-K1 卫星 CDMA	CDMA BOC 和 BPSK	QPSK 和 BOC	CDMA BPSK,BOC
服务和带宽	SPS L1 2.046MHz PPS L1 和 L2 20.46MHz L2C（2016 年） L5（2018 年）20.46MHz		开放 E1 24.552MHz 开放 E5a+E5b 20.46MHz	开放 B1 4.092MHz 开放 B2 24MHz	L1 24MHz L2 24MHz L5 24.9MHz
注：CDMA 码分多址；FDMA 频分多址；BPSK 二进制相移键控；QPSK 正交相移键控；BOC 二进制偏移载波；SPS 标准定位服务；PPS 精确定位服务					

1.2 全球卫星导航系统的基本原理

1.2.1 基于时间的无线电导航

全球卫星导航系统的基本原理在于距离的精确测量，这个距离是一定数量卫星（至少 4 颗）中每颗卫星到接收机的距离，每颗卫星都会发射准确的定时信号和其他提供卫星位置的编码信号。用户接收机和卫星之间的距离是通过计算信号在卫星与接收机间传播时延得到的，信号以光速传播。基于此，在已知卫星

精确空间位置的前提下，一个三维测距系统便可以实现。要理解这个原理，可以参考图 1.1 所示的简单的离岸海上二维定位系统。假设发射机 1 能够不断传递如下消息——“发射机 1 的下一个脉冲时间是……”，该时间来源于一个高度精确的时钟（原子钟）。接收机移动过程中（例子中的船舶）中接收到这个信号的时间延迟为 ΔT_1 ；信号以光速 c 传播，从发射机到船的距离 D_1 可以根据 $D_1 = c\Delta T_1$ 来确定。

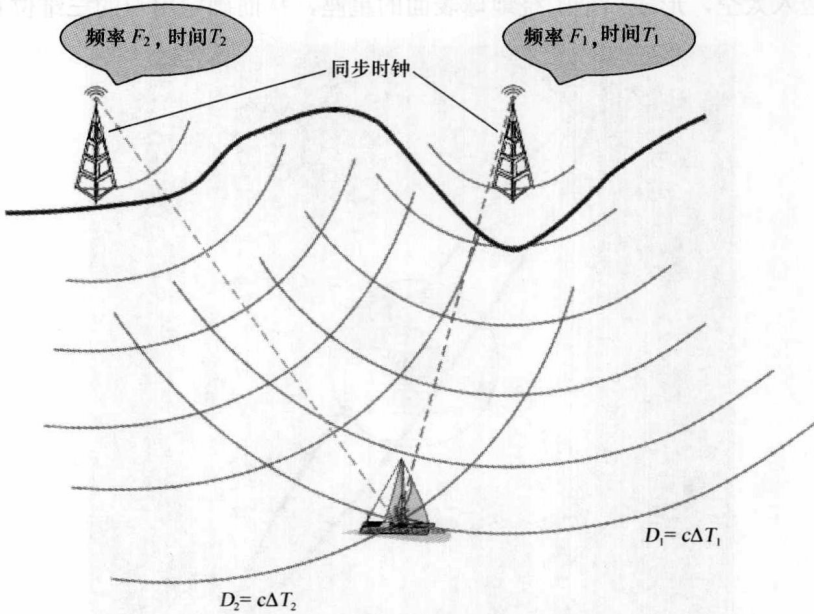


图 1.1 简单的二维区域性船舶海岸定位系统

同样的过程可用于发射机 2，从而得到距离 D_2 。然后，如果用户有一个图表可显示岸基发射机 1 和发射机 2 的精确位置，就可以构造半径为 D_1 和 D_2 的弧，从而确定用户位置。为了系统的准确，三个时钟（位于两个发射机和船上）必须同步。实际上，同步两个陆基的发射机并不困难，但船基时钟同步却并不容易，且其同步水平会从根本上决定定位精度。由于光 $1\mu\text{s}$ 传播 300m，如果船上的时钟误差为 $\pm 1\mu\text{s}$ ，那么距离偏差将达到 $\pm 300\text{m}$ 。这个简单的系统可以归结为含有两个未知数的方程组的求解问题（两个未知数分别为船的位置坐标分量 (u_x, u_y) ）。然而，在现实中，有第三个未知数，即该船时钟与陆基同步时钟间的偏移。这个问题可以通过在系统中增加第三个发射机来解决，它提供了第三个方程，三个方程解三个未知数，由此确定船的位置分量 u_x, u_y 。我们将在后面对全球卫星导航系统的三维定位介绍中详细探讨这个问题。图 1.1 所示的是一个实际的区域沿海导航系统，由于所有的船只都在发射机的南面，不存在方程多值性问题，因此作为一个本地沿海导航系统，它是可行的。

该系统有一大优点，即船在定位过程中不需要主动发射信号，只需接收放射

机传来的信号以确定位置。因此，系统的用户数目是没有限制的，并且由于仅仅接收信号，对船主来说成本也较低。

1.2.2 基于时间的三维导航系统

如图 1.2 所示，我们可以扩展这个以时间延迟为基础的导航定位概念，通过将发射器送入太空，形成一个围绕地球表面的星座，从而确定用户的三维位置。

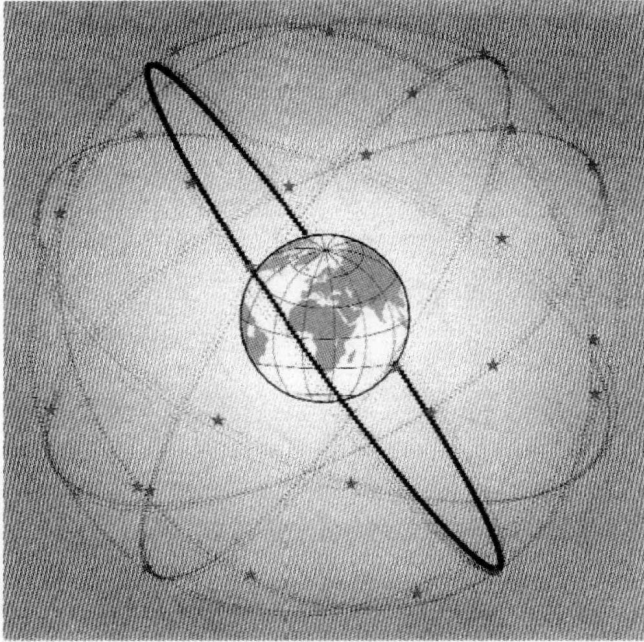


图 1.2 卫星星座^[5]

为了使这个系统能够运行，要求用户在任意时刻都至少能观察到（即通过直视）四颗卫星，需要四个发射机。这是因为，为了确定卫星到用户的距离，需要四个方程来解四个未知数，即用户的坐标 (u_x, u_y, u_z) 和用户的时钟相对于 GPS 时的偏移。GPS 时的概念是，所有卫星上的时钟完全相同。在实际中，使用一个（或多个）原子时钟，但通过采用一系列陆基监控站检查每颗卫星的时钟，可以将原子时与 GPS 时的偏差发送到卫星，然后再发送给需要确定其所在位置的用户。

在定位中每颗卫星的位置坐标 (x, y, z) 必须准确已知，尽管开普勒运动定律可有效预测卫星位置，但使用上述监控站可以提供补充的位置修正。这些监测站（其准确的位置是已知的）可以用来精确地确定卫星的轨道位置，并向每颗卫星发送它们的轨道位置修正量，再通过发射给用户的 GPS 信号将这些改正量传给用户。因此，每颗卫星将有效传输“下一个脉冲时间是……，时钟偏离 GPS 时的时间是……，轨道位置改正量是……”等内容。

四星定位的示意图如图 1.3 所示，对应的用户与卫星 1 之间的距离 R_1 的表示

方程为

$$R_1 = c(\Delta t_1 + \Delta T - \tau_1) \quad (1.1)$$

式中： Δt_1 为从卫星 1 到用户的真实传输延迟； τ_1 为卫星 1 的 GPS 时间修正量； ΔT 为未知用户时钟与 GPS 时的偏移。消除卫星 1 时钟误差后的修正距离 R'_1 表示为

$$R'_1 = c(\Delta t_1 + \Delta T) \quad (1.2)$$

那么卫星 1 和用户终端之间的真实距离为

$$C\Delta t_1 = R'_1 - c\Delta T = R'_1 - C_B \quad (1.3)$$

式中： C_B 为在一个给定的测量时间下对一个给定用户的固定量。

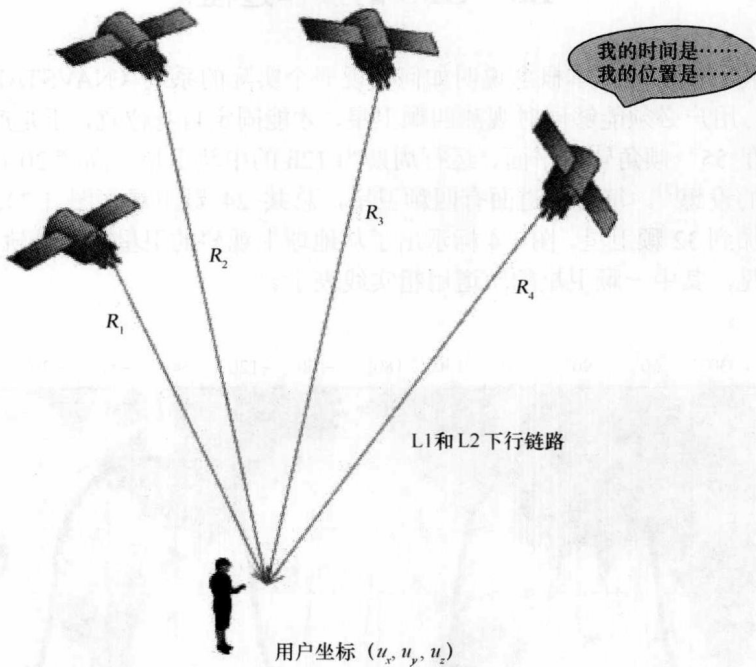


图 1.3 四星定位示意图

在笛卡儿坐标系中，经过卫星轨道改正量修正得到的卫星 1 的真实位置 (x_1, y_1, z_1) 与用户终端位置 (u_x, u_y, u_z) 之间的距离方程为

$$(x_1 - u_x)^2 + (y_1 - u_y)^2 + (z_1 - u_z)^2 = (R'_1 - C_B)^2 \quad (1.4)$$

其余三颗卫星的相应方程为

$$\begin{cases} (x_2 - u_x)^2 + (y_2 - u_y)^2 + (z_2 - u_z)^2 = (R'_2 - C_B)^2 \\ (x_3 - u_x)^2 + (y_3 - u_y)^2 + (z_3 - u_z)^2 = (R'_3 - C_B)^2 \\ (x_4 - u_x)^2 + (y_4 - u_y)^2 + (z_4 - u_z)^2 = (R'_4 - C_B)^2 \end{cases} \quad (1.5)$$

方程 (1.4) 和方程 (1.5) 构成的含有四个未知数 (u_x, u_y, u_z, C_B) 的四个方程能够确定用户终端的位置。

以类似的方式, 可以通过测量从四颗卫星发射信号的载波频率的多普勒频移来确定用户终端的速度。在时间问题上, 由接收机本地时钟与 GPS 时之间的偏移量所带来的误差可以通过观测四颗卫星得以消除。三个速度分量加上这个偏移量组成的方程组再次给出了含有四个未知数 (V_x, V_y, V_z , 用户时钟偏移量) 的四个方程。

1.3 GPS 的操作过程

本节将利用上述基本概念说明如何实现一个实际的系统 (NAVSTAR GPS)。如上所述, 用户必须能够同时观测四颗卫星, 才能固定自身位置, 于是产生了由 6 个与赤道呈 55° 倾角轨道平面、运行周期为 12h 的中轨卫星 (高度 20 183km) 组成的星座的设想^[3]。每个轨道面有四颗卫星, 总共 24 颗卫星 (图 1.2); 到 2010 年已经增加到 32 颗卫星。图 1.4 标示出了从地球上观察的卫星的两个轨道 (24h), 为清晰起见, 其中一颗卫星的轨道用粗实线表示。

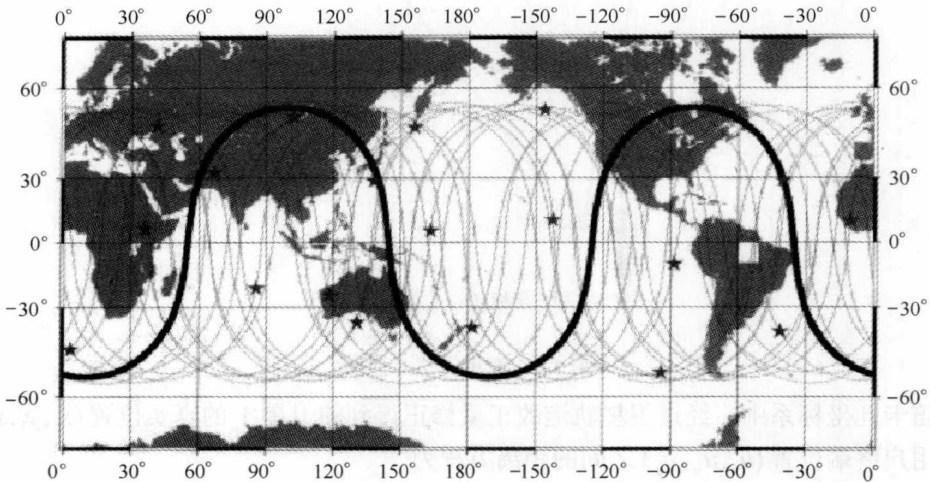


图 1.4 从地球上观察的卫星的两个轨道 (24h), 其中一条轨道加粗以清晰表示

尽管一颗给定的卫星, 在一个给定的地点每天都提前 4min 出现, 但这种模式每天不断重复。为避免多径传播的问题, 在一个开放 (非市区) 的环境下, 需要这四颗“可见”卫星的仰角均大于 15° 。从图 1.5 中可以看到, 这可以在地球表面的任何一点得以实现, 即使在地球两极。

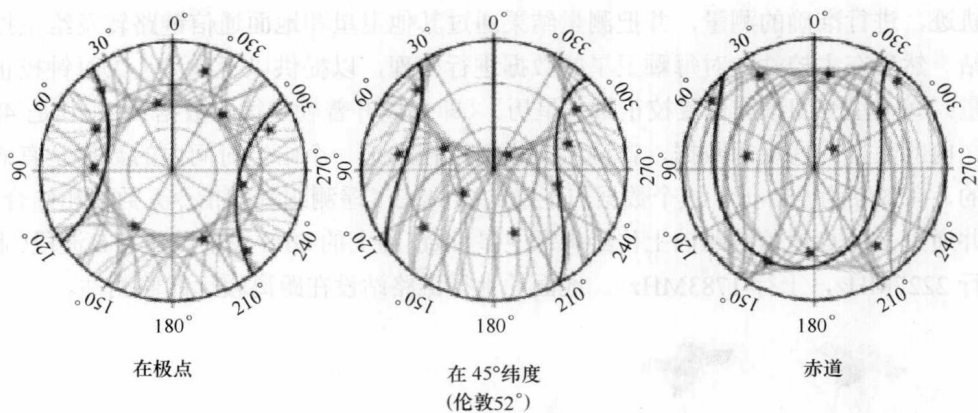


图 1.5 用户的星座视角

图中五角星代表任一时间卫星位置，粗线是天空图中心为天顶位置时的卫星轨迹，外圆为地平线。

仔细选择四颗卫星可以帮助提高一个固定的位置准确度，这可以简单地在如图 1.6 所示的二维导航系统中表示，称为几何精度因子。当然，这个概念也可以扩展到三维的 GPS 星座图。

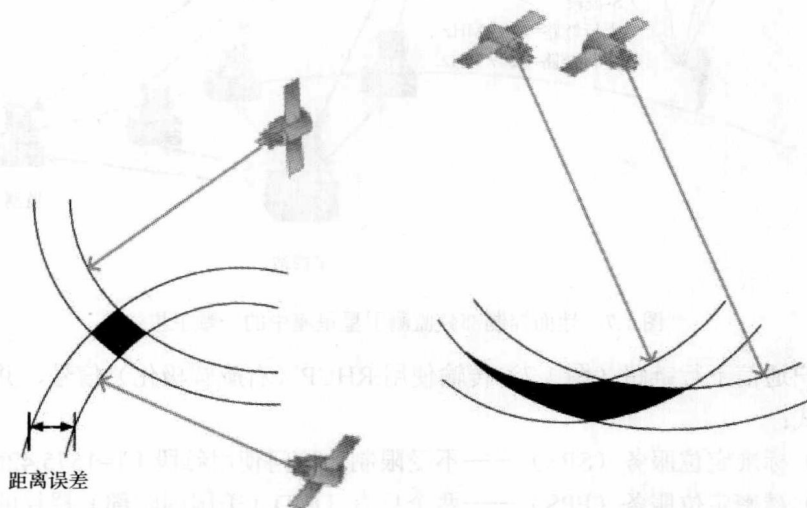


图 1.6 卫星相对位置距离误差二维示意图（阴影部分代表不确定位置区域）

GPS 卫星的时间是在卫星上通过使用铯和一对铷原子钟保持的，它能提供的定时精度优于 1 ns，该精度能通过向用户传递时钟调整信息得到进一步提高，该信息由 GPS 系统地面控制部分确定。

地面控制部分的概况如图 1.7 所示，它由一个主控站（MCS）和分布在全球各地的远程监控站组成。这些监测站在卫星经过它们上空时被动地跟踪 GPS 卫星