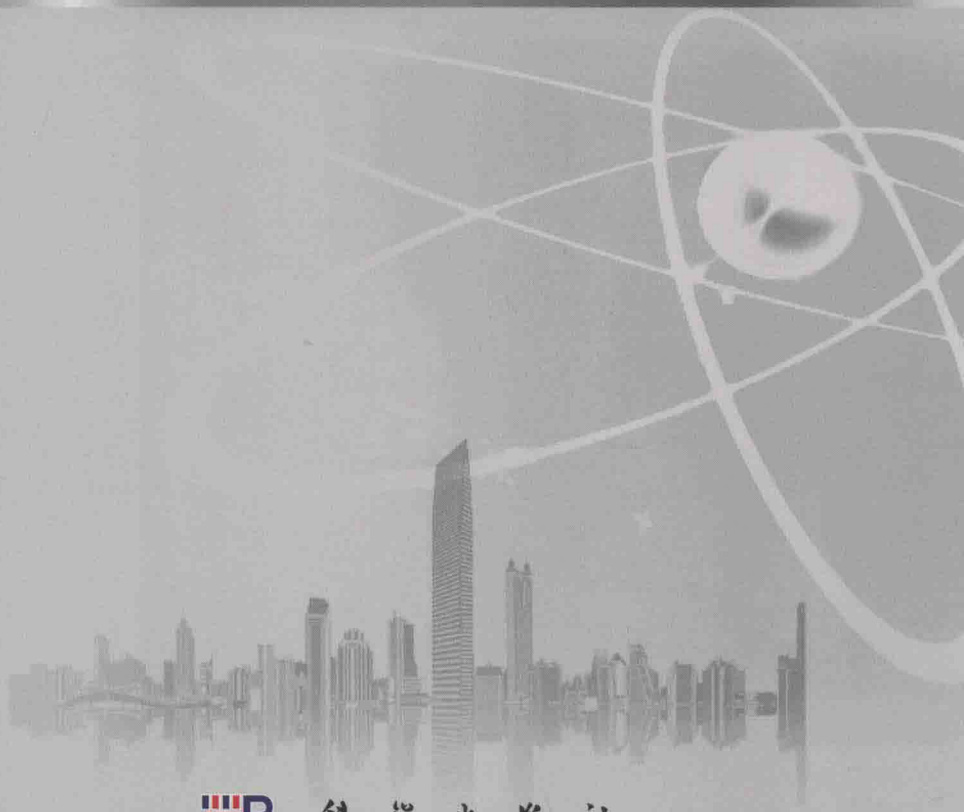


卫星导航定位系统 原理与应用

王 博 编著



科学出版社

卫星导航定位系统原理与应用

王 博 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书紧密结合当前卫星导航定位系统的技术和应用发展状况,较为全面地介绍卫星导航定位系统的基本原理和典型的市场应用。内容包括卫星导航系统的发展、坐标与时间参考系统、各国现有的全球和区域卫星导航系统,以及卫星导航系统的定位原理、误差分析和定位方法等方面的主要研究成果。同时结合我国北斗卫星导航系统的建设和应用推广,针对卫星导航与位置服务应用等方面阐述当前的规模化市场应用。

本书可作为导航、控制、测绘、交通、信息等专业本科生学习的教科书,也可作为相关行业应用人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位系统原理与应用 / 王博编著. —北京:科学出版社,2018.8
ISBN 978-7-03-057213-4

I. ①卫… II. ①王… III. ①卫星导航-全球定位系统-研究
IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 074210 号

责任编辑:张艳芬 姚庆爽 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第一版 开本:720×1000 B5

2018年8月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:300 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着“互联网+”和“大数据”时代的到来,全球卫星导航系统(GNSS)不断地焕发出新的活力。空间技术的不断进步促使卫星导航定位系统从原有的全球定位系统(GPS)和全球卫星导航系统(GLONASS),发展为包含北斗卫星导航系统(BDS)和伽利略(Galileo)卫星导航系统在内的四大全球卫星导航定位系统。正如我国“两弹一星”元勋、北斗卫星导航系统首任总设计师孙家栋院士所倡导的“天上好用、地上用好”理念,地面的卫星导航与位置服务应用也随着我国北斗系统的不断完善而推陈出新,在面向国家安全和国计民生的特殊市场、专业市场和大众市场得到了广泛应用。据中国卫星导航定位协会统计,2016年我国卫星导航与位置服务产业的总产值已经突破2000亿元,其中北斗系统相关产值占据70%。因此,发展自主可控的北斗卫星导航系统不仅关系到我国的国家安全,而且也极大地促进了我国的经济发展。随着移动互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等一系列新兴技术的发展,卫星导航与位置服务和各个行业进行深度融合,将会给产业发展带来更加蓬勃的生机。

本书是作者在查阅国内外相关文献并总结以往部分研究成果的基础上完成的。全书共8章:第1章介绍导航技术的基本概念以及卫星导航系统的发展情况;第2章介绍空间坐标系统和时间参考系统;第3章对全球卫星导航系统、区域卫星导航系统、星基增强系统和地基增强系统进行介绍;第4章介绍北斗卫星导航系统的服务性能、短报文通信服务、地基增强系统以及精准服务系统;第5章介绍卫星导航系统的信号结构、定位原理和接收机工作原理;第6章对卫星导航系统中的空间段、环境段和用户段误差的产生和消除方法进行阐述;第7章介绍卫星导航系统的定位方式、差分定位方法、姿态测量方法和干扰与反干扰方法;第8章介绍卫星导航与位置服务在交通物流、市政管网、养老关爱、安全监测、应急救援、精准农业、电力授时、城市管理和自动驾驶行业中的应用。

在撰写本书过程中,王诚龙博士、赵冲硕士、朱经纬硕士、周明龙硕士和刘泾洋硕士对稿件进行了整理并绘制了插图。本书中的行业应用分析内容得到了中国卫星导航定位协会及其智能物联专业委员会和精准应用专业委员会的大力支持。本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目(61673060)和国家重点研发计划(2016YFB0501700)的支持,在此一并表示感谢。国家测绘地理信息局战略研究首席专家苗前军博士对本书初稿进行了审阅,提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷

心感谢。

卫星导航定位系统作为一门正在发展的高新技术,不仅涉及多种学科理论的交叉,同时还是一项工程性很强的应用技术。限于作者水平,书中难免存在疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

王 博

2018年5月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 导航的基本概念与发展	1
1.1.1 导航的基本概念	1
1.1.2 导航技术的分类	1
1.1.3 卫星导航的性能指标	6
1.2 卫星导航系统概述	8
1.2.1 卫星导航系统的基本概念	8
1.2.2 卫星导航系统的特点	8
1.2.3 卫星导航的应用	10
1.3 卫星导航系统发展	11
参考文献	15
第 2 章 空间坐标与时间参考系统	16
2.1 空间坐标系统	16
2.1.1 坐标系统概述	16
2.1.2 天球和天球坐标系	17
2.1.3 地球坐标系	24
2.1.4 卫星导航定位系统所采用的坐标系统	30
2.1.5 地图投影与高斯-克吕格平面直角坐标系	33
2.1.6 坐标变换	39
2.2 时间参考系统	41
2.2.1 时间的基本概念	41
2.2.2 世界时系统	43
2.2.3 原子时系统	44
2.2.4 力学时系统	44
2.2.5 协调世界时系统	45
2.2.6 GPS 时间系统	45
2.2.7 北斗时间系统	46
2.2.8 卫星导航定位中的时间表示方法	48
参考文献	48

第 3 章 卫星导航定位系统介绍	50
3.1 概述	50
3.2 全球卫星导航系统	51
3.2.1 GPS	51
3.2.2 GLONASS	54
3.2.3 北斗卫星导航系统	59
3.2.4 Galileo 卫星导航系统	63
3.3 区域卫星导航系统	66
3.3.1 日本 QZSS	66
3.3.2 印度 IRNSS	68
3.4 星基增强系统	68
3.4.1 美国 WAAS	68
3.4.2 欧洲 EGNOS	69
3.4.3 日本 MSAS	69
3.4.4 印度 GAGAN	70
3.4.5 俄罗斯 SDCM	70
3.5 地基增强系统	71
3.5.1 国外地基增强系统	71
3.5.2 北斗地基增强系统	72
参考文献	72
第 4 章 北斗卫星导航系统	73
4.1 北斗系统服务性能	73
4.1.1 北斗系统服务区	73
4.1.2 北斗系统空间信号性能	73
4.1.3 北斗系统服务性能特征	75
4.2 北斗短报文通信服务	76
4.2.1 北斗短报文通信特点	77
4.2.2 北斗短报文通信方式	77
4.2.3 北斗短报文服务应用	78
4.3 北斗地基增强系统服务	79
4.3.1 北斗地基增强系统组成	79
4.3.2 北斗地基增强系统服务产品	80
4.3.3 北斗地基增强系统服务性能指标	81
4.4 北斗卫星导航系统精准服务	82
4.4.1 全国卫星导航定位基准服务系统	82

4.4.2 国家北斗精准服务网	83
参考文献	85
第5章 卫星导航系统定位原理	86
5.1 卫星导航系统信号结构	86
5.1.1 卫星导航系统信号基础	86
5.1.2 GPS 信号结构	86
5.1.3 GLONASS 卫星信号	93
5.1.4 Galileo 卫星信号	97
5.1.5 北斗卫星信号结构	99
5.2 卫星导航定位原理	100
5.2.1 伪距法测量	100
5.2.2 伪距观测方程及定位计算	102
5.2.3 载波相位测量	106
5.2.4 卫星导航定位的精度	108
5.3 卫星导航接收机工作原理	111
5.3.1 卫星导航接收机基础	111
5.3.2 GNSS 接收机信号原理	115
参考文献	125
第6章 卫星导航系统误差与消除方法	126
6.1 卫星导航系统误差分析	126
6.1.1 卫星导航系统误差简介	126
6.1.2 用户等效距离误差	128
6.1.3 消除或削弱各种误差影响的方法	129
6.2 空间段误差及消除方法	130
6.2.1 卫星星历误差及消除方法	130
6.2.2 卫星时钟误差及消除方法	133
6.2.3 相对论效应的影响及消除方法	133
6.2.4 GPS 中美国政府对用户的限制性政策与用户的措施	135
6.3 环境段误差及消除方法	138
6.3.1 电离层延迟误差及消除方法	139
6.3.2 对流层延迟误差及消除方法	148
6.3.3 多路径效应及消除方法	150
6.4 用户段误差及消除方法	154
6.4.1 观测误差及消除方法	154
6.4.2 接收机钟差及消除方法	154

6.4.3	接收机天线相位中心偏差及消除方法	155
6.4.4	载波相位观测的整周跳变及消除方法	156
6.4.5	地球自转及消除方法	159
6.4.6	地球潮汐效应以及消除方法	159
	参考文献	161
第7章	卫星导航定位方法	163
7.1	定位方式	163
7.1.1	静态定位与动态定位	163
7.1.2	绝对定位与相对定位	164
7.1.3	伪距测量与载波相位测量	165
7.1.4	静态单点定位与动态单点定位	166
7.1.5	伪距单点定位与伪距相对定位	167
7.1.6	载波相位单点定位与载波相位相对定位	169
7.2	差分定位方法	171
7.2.1	差分定位分类	172
7.2.2	常用的差分定位系统	178
7.3	姿态测量方法	181
7.3.1	整周模糊度求解	182
7.3.2	周跳	184
7.3.3	姿态求解	184
7.3.4	实时性	185
7.3.5	基本观测量	186
7.3.6	观测方程	188
7.3.7	姿态测量的一般步骤	190
7.4	卫星导航系统的干扰与反干扰	196
7.4.1	卫星导航系统的脆弱性	196
7.4.2	干扰技术	196
7.4.3	抗干扰技术	200
	参考文献	202
第8章	卫星导航与位置服务应用	203
8.1	应用概述	203
8.2	交通物流行业应用	204
8.2.1	概述	204
8.2.2	应用方案	205
8.2.3	应用功能	208

8.3 市政管网行业应用	209
8.3.1 概述	209
8.3.2 应用方案	210
8.4 养老关爱行业应用	213
8.4.1 概述	213
8.4.2 关键技术	214
8.5 安全监测行业应用	216
8.5.1 概述	216
8.5.2 关键技术	217
8.6 应急救援行业应用	220
8.6.1 概述	220
8.6.2 应用方案	220
8.7 精准农业行业应用	222
8.7.1 概述	222
8.7.2 关键技术	223
8.7.3 应用方案	224
8.8 电力授时行业应用	227
8.8.1 概述	227
8.8.2 关键技术	228
8.8.3 应用方案	229
8.9 城市管理行业应用	231
8.9.1 概述	231
8.9.2 应用方案	232
8.10 自动驾驶领域应用	234
8.10.1 概述	234
8.10.2 关键技术	234
参考文献	235

第 1 章 绪 论

1.1 导航的基本概念与发展

1.1.1 导航的基本概念

导航是监测和控制运载体从一个地方移动到另一个地方的过程,它是引导飞机、船舶、车辆以及个人(总称为运载体)安全、准确地沿着选定的路线,到达目的地的一种手段。

导航是将运载体从起始地引导到目的地的技术,这门技术既古老又年轻。古罗马人利用北极星和太阳作为方位基准,横渡地中海,来往于南欧和北非之间。郑和利用指南针率领庞大的船队七下西洋,开创了茫茫大海上的远航。古代先辈在导航过程中利用的信息资源如天文、地磁等,非常直观,采用的方法和原理也十分简单,所以导航精度非常低。随着人类对自然现象本质的深入认识和科学技术的发展,导航的新理论和新手段不断被发明和发现,越来越多的导航技术应运而生。1519年,葡萄牙航海家麦哲伦利用地球仪、经纬仪、四分仪测速器等导航设备进行了环球航海航行。科技的进步导致用户对导航定位精度、覆盖面要求也越来越高,罗盘导航和天文导航方法已经不能满足现代导航的需要。因此,无线电导航、惯性导航、卫星导航、匹配导航等现代导航技术在现代人们的生活中发挥着越来越重要的作用。

1.1.2 导航技术的分类

根据导航信息的获取原理,如航标方法、航位推算、惯性原理、无线电传播特性、天体运动规律、人造地球卫星技术、地球表面地形、地貌特征等,常见的导航技术可分为航标方法导航、航位推算导航、天文导航、惯性导航、无线电导航、卫星定位导航、地球物理场辅助导航等。

1. 航标方法导航

航标方法也称为目视方法,它是借助于信标或参照物把载体从一点引导到目的地的导航方法。采用此种方法导航有海上的信标(灯塔等)、机场导航灯等,如图 1.1 所示。此种方法实现简单且可靠性高,但存在明显的缺点,即环境、天

气对此种导航方法的影响很大,并且在海洋、沙漠等无航标地区无法进行导航。

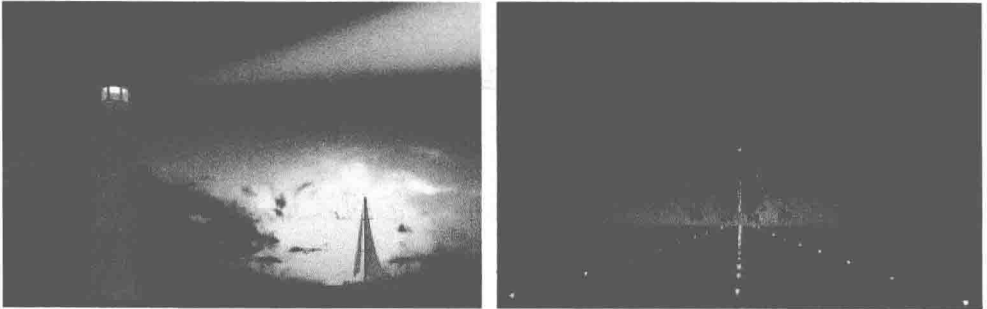


图 1.1 航标方法导航

2. 航位推算导航

航位推算通过测量运载体的速度和方向数据来累积求得载体在各方向分量上行驶的距离,由过去已知位置来推算当前位置,或预测未来位置,从而得到运载体运动轨迹的一种导航方法,如图 1.2 所示。航位推算导航是一种自主式的导航方法,隐蔽性好且保密性强,它克服了航标方法导航的缺点,不受天气、地理条件的限制。但是,其缺点也非常明显,一旦航行时间和航行距离增长,其位置累积误差将越来越大。因此,如果进行长时间、长距离导航,需要与其他导航方法组合使用,以对误差进行校正。

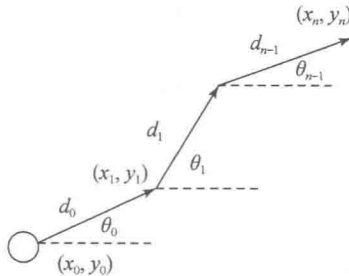


图 1.2 航位推算导航

3. 天文导航

天空中的星体相对于地球有一定的相对运动轨道和位置。天文导航就是通过对天体的精确、定时观测来确定载体的位置,如图 1.3 所示。此种导航方法在航海、航空、航天等领域具有广泛的应用,但其缺点也十分明显,这种导航方法受时间、气象条件的限制,定位时间较长,操作计算比较复杂。



图 1.3 天文导航

4. 惯性导航

惯性导航是通过对安装在稳定平台上或与运载体固联的陀螺和加速度计的输出生成积分来确定载体的姿态、速度和位置,进而引导运载体正确航行,如图 1.4 所示。惯性导航完全依靠运载体上的导航设备自主地完成导航任务,与外界没有任何光、电联系,是一种自主式导航方法,具有隐蔽性好、工作不受天气条件限制等优点,但是其导航误差随时间发散,一旦系统运行时间增长,误差也会随之增大,以至系统无法正常导航。

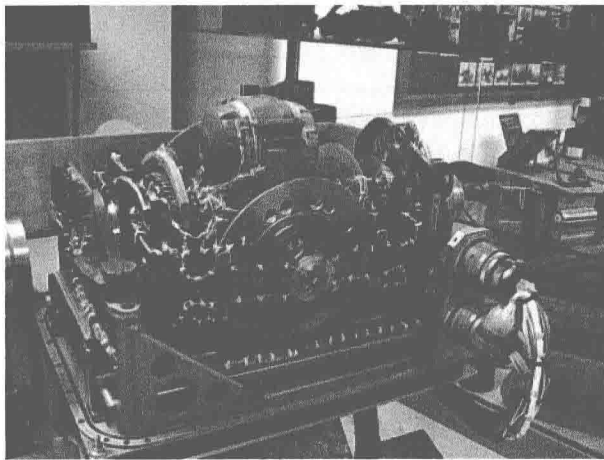


图 1.4 惯性导航设备

5. 无线电导航

无线电导航是通过测量无线电波从发射台到运载体的传输时间来确定运载体

位置,也可通过测量无线电波的相位或相角来定位,其原理是基于电磁波的恒定传播速率和路径的可观测性原理,如图 1.5 所示。不同的无线电导航系统只是无线电波段和使用地域不同而已,可分为陆基无线电导航和星基无线电导航两种。无线电导航不受时间、天气的限制,设备简单、可靠,定位精度高、定位时间短,并且可以实现连续实时地定位。因此,无线电导航被广泛用于航海、航空等领域,是一种非常重要的导航方式。

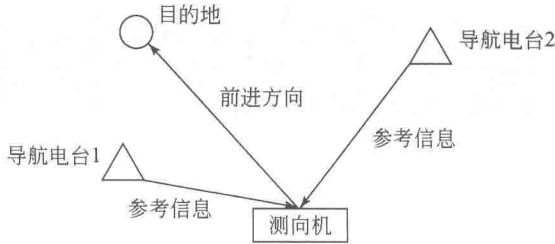


图 1.5 无线电导航

无线电导航主要分为陆基无线电导航和星基无线电导航两种。陆基无线电导航是指以无线电技术为基础的导航台建在地球上的导航系统,该导航系统主要有三种测量方式:测向(角)(angle of arrival, AOA)、测距(time of arrival, TOA)和测距差(time difference of arrival, TDOA)。

AOA 通过三角测量法定位,信号由发射机(MS)发射,处在已知位置的天线阵列(BS₁、BS₂)接收信号并计算信号到两个或多个天线单元的入射角,运载体位置由入射角的交叉点确定,如图 1.6 所示。

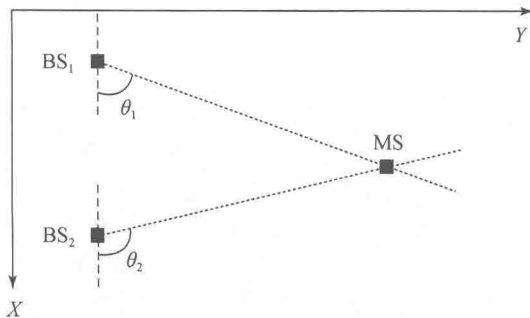


图 1.6 AOA 测量方式

TOA 通过测量从多个已知位置的发射机传来的无线电信号到达接收端的时间来确定接收机的位置,如图 1.7 所示。

TDOA 采用三边测量法定位,由多个已知位置的发射机发送时间同步信号,移动接收机接收信号并测量至少两组信号的到达时间差,由此确定接收机的位置,

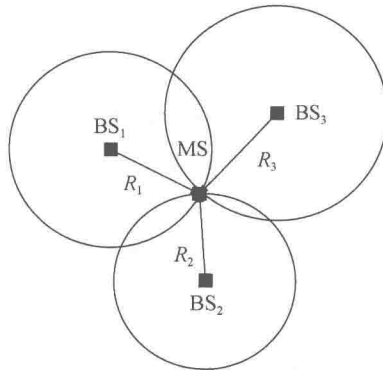


图 1.7 TOA 测量方式

如图 1.8 所示。

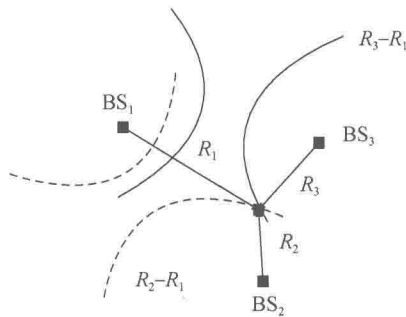


图 1.8 TDOA 测量方式

地基无线电导航系统已经在航海和航空领域得到了广泛应用,约有 100 种不同类型的系统正在世界各地运营,如著名的 Loran-C 和 OMEGA 系统。Loran-C 是一种中远程精密无线电导航系统,主要包括地面设施和用户设备两大部分,地面设施由发射台组和监测站构成。该系统的工作原理是:用户设备接收到两个发射台信号到达的 TDOA,乘以电波传播速度,将其换算为距两个发射台的距离差值(为一双曲线),再接收另外两个台的信息,便可得另一双曲线,利用两条双曲线的交点即可计算出用户位置。

第二次世界大战期间及战后,军事方面的迫切需求加速了陆基无线电导航系统的发展。近年来,随着无线电导航技术特别是卫星定位导航技术的发展和完善,许多陆基无线电导航系统已停用或即将停用。

星基无线电导航是目前应用非常广泛的一种无线电导航技术,将在下一部分卫星定位导航中详细介绍。

6. 卫星定位导航

卫星导航是利用卫星播发的无线电信号进行导航定位。卫星导航以卫星为空间基准点,向用户终端播发无线电信号,从而确定用户的位置、速度和时间。它不受气象条件、航行距离的限制,而且导航精度高。

1957年10月,世界上第一颗人造卫星的发射成功使人类在空间建立导航无线电发射基准站的设想变成了现实,星基无线电导航系统也随之应运而生,这就是卫星定位导航系统。与传统的定位方法相比,卫星导航不但能够在全球范围内为陆地、海洋以及近地空间的用户提供连续准确的位置、速度和时间信息,而且用户设备体积小、重量轻、功耗小、价格低、易于操作,从而给导航技术带来了革命性的变化。

1.1.3 卫星导航的性能指标

1. 精度

卫星导航系统的精度是导航系统为运载体提供的位置与运载体当时的真实位置之间的重合度。精度用导航误差的大小来衡量,导航误差是一个随机变化的量,常用统计的度量单位来描述,即用定位误差不超过一个数值的概率来描述,如图 1.9 所示。

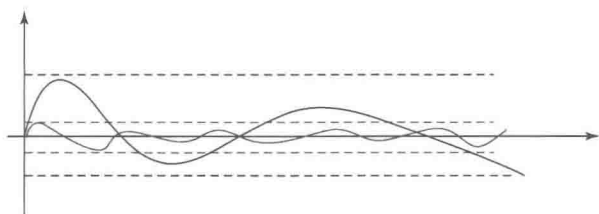


图 1.9 导航精度描述

导航精度主要由以下指标衡量。

1) 均方根误差

均方根误差(root mean square error, RMS)又称为中误差或标准差,它的探测概率是以置信椭圆(二维定位)和置信椭球(三维定位)来表述。

2) 圆概率误差

圆概率误差(circular error probable, CEP)一般是以载体真实位置为圆心的圆内,偏离圆心概率为 50% 的二维点位离散分布度量,如图 1.10 所示。

3) 球概率误差

球概率误差(sphere error probability, SEP)其以载体真实位置为球心的球内,

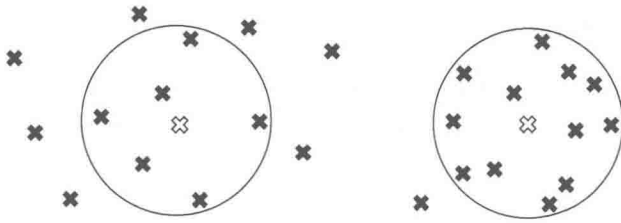


图 1.10 不同概率的圆概率误差

偏离球心概率为 50% 的三维点位精度分布度量。

不同度量标准下的定位精度如图 1.11 所示。

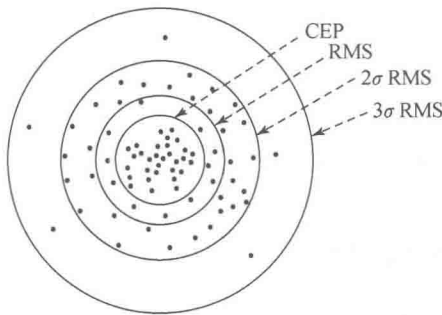


图 1.11 不同度量标准下的定位精度

2. 可用性与可靠性

可用性是导航系统为运载体提供可用的导航服务的时间百分比。

可靠性是给定条件下在规定时间内以规定的性能完成其功能的概率，主要以发生故障的频度和平均无故障工作时间作为可靠性评价指标。

3. 覆盖范围

覆盖范围是指在一个面积或立体空间范围内，导航系统以规定的精度为载体提供位置。影响因素包括系统几何关系、发射信号功率、接收机灵敏度、大气噪声条件等。

4. 导航信息更新率

导航信息更新率是指导航系统输出信息的频率，卫星导航接收机输出的频率从 1Hz 到 100Hz 不等。