



高新科技译丛

导航与定位技术系列



科工精译



Springer

Fundamentals of Inertial Navigation,
Satellite-based Positioning and their Integration

惯性导航、卫星定位及其 组合的基本原理

[加] Aboelmagd Noureldin Tashfeen B. Karamat Jacques Georgy 著

黄卫权 赵琳 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

惯性导航、卫星定位及其 组合的基本原理

Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite – based
Positioning and their Integration

[加] 埃博尔梅德·纽若丁 Aboelmagd Noureldin
塔什芬·卡拉麦特 Tashfeen B. Karamat 著
雅克·乔治 Jacques Georgy
黄卫权 赵琳 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-024号

图书在版编目(CIP)数据

惯性导航、卫星定位及其组合的基本原理/(加)艾博尔梅德·纽诺丁(Aboelmagd Noureldin),(加)塔什芬·卡拉麦特(Tashfeen B. Karamat),(加)雅克·乔治(Jacques Georgy)著;黄卫权,赵琳译. —北京:国防工业出版社,2017.5

(科工精译)

书名原文:Fundamentals of Inertial Navigation,
Satellite-based Positioning and their Integration

ISBN 978-7-118-10860-6

I. ①惯… II. ①艾… ②塔… ③雅… ④黄… ⑤赵…
… III. ①惯性导航 ②卫星定位 IV. ①TN96 ②P228.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第101107号

Translation from the English language edition: Fundamentals of Inertial Navigation,
Satellite-based Positioning and their Integration.

by Aboelmagd Noureldin, Tashfeen B. Karamat and Jacques Georgy.

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

All rights reserved

本书简体中文版由 Springer 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16¼ 字数 312 千字

2017年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 96.00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

谨以此书献给我的父亲与母亲,感谢他们无私的爱与奉献。献给我的妻子与三个儿子:Abdelrahman、Yehia、Tareq,感谢他们的支持、鼓励与忍耐。

——Aboelmagd Noureldin

感谢我的父母 Karamat 和 Safeena 给我的爱,感谢哥哥 Khaver 在父母早逝后对我的支持。感谢妻子 Shazia 和儿子 Fahaam、Saarim 坚定的鼓励。

——Tashfeen B. Karamat

感谢我的妻子 Sarah 对我的爱与无尽的支持。感谢我的父母 Ford 和 Lucie 对我的爱、鼓励与支持,融入我生活的点点滴滴。感谢我的妹妹 Basma 对我的爱与鼓励。

——Jacques Georgy

译者序

当前还没有哪一种导航定位技术既能够确保服务区域可以覆盖不同的异构环境,又能够长时间提供高精度的导航定位信息。惯性导航系统突出的优点是完全自主式导航,它应用陀螺仪和加速度计测量运载体的角运动和线运动参数,根据牛顿运动定律推算载体的瞬时速度和位置进行导航定位;但惯性导航系统的缺点也是由于空间积分导致系统的误差会随时间增长。卫星导航系统的误差规律恰好与惯性导航系统相反,易受电波传输、气象等因素影响,且每次定位都有一定的误差,但测量定位的误差变化与两次测量相隔的时间几乎无关。组合导航系统突破了单一导航系统的局限性,将惯性导航与卫星导航两者取长补短,从而为用户提供更加精确、可靠、全面的导航信息。

一般的惯性导航、卫星导航和组合导航书籍,由于专业性较强,且公式推导繁多,往往要求读者有较强的专业背景知识和较好的专业知识综合运用能力,存在入门难的问题。本书由一直从事惯性导航系统/GPS 及其他导航传感器组合导航研究与应用的三位加拿大作者撰写,他们立足于读者能以最少的专业背景知识轻松阅读与理解惯性导航、卫星导航和组合导航,因此通过极其详细地解释推导过程和中间步骤,配以大量详细的插图和所有必要的细节,循序渐进地展示了导航算法的实现,即使是初学者也能跟着本书内容一步一步地学完导航算法;最后,作为导航知识的集成与综合应用,本书以实际的野外试验和车载试验结果及其专业的分析和讨论,直观且易于理解地示例了包括松组合与紧组合、开环与闭环等在内的各种不同的惯性导航/GPS 组合导航方案及其性能。

作为一本介绍组合导航领域内容的书,由于其内容具有详实全面、循序渐进、深入浅出和使读者能以最少的专业背景知识轻松阅读、易于理解的特点,既适合本领域研究人员和工程技术人员作为优秀的参考书,同时也适合刚进入本领域的本科生和初学者当作教材使用。

本书由哈尔滨工程大学的黄卫权和赵琳共同翻译完成,其中第2章~第6章、第10章由黄卫权翻译,缩略词、第1章、第7章~第9章由赵琳翻译;李久顺博士和贾春博士参与了初稿的章节翻译与图片处理工作。

由于译者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2017年2月

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 常用的定位技术分类 | 1 |
| 1.1.1 相对测量技术(航迹推算法) | 1 |
| 1.1.2 绝对测量技术(参考基准法) | 2 |
| 1.1.3 组合系统 | 3 |
| 1.2 全球导航卫星系统技术 | 3 |
| 1.2.1 全球定位系统 | 4 |
| 1.3 GPS 与其他系统的组合 | 6 |
| 1.3.1 GPS 增强系统 | 6 |
| 1.3.2 当地无线定位系统 | 7 |
| 1.3.3 运载体运动器件 | 8 |
| 1.3.4 其他辅助器件 | 9 |
| 1.3.5 电子地图 | 10 |
| 1.4 惯性导航 | 10 |
| 1.5 INS/GPS 组合导航 | 11 |
| 1.6 INS/GPS 组合类型 | 12 |
| 1.6.1 松组合 | 12 |
| 1.6.2 紧组合 | 12 |
| 1.6.3 超紧(深)组合 | 12 |
| 1.7 INS/GPS 融合算法 | 13 |
| 1.8 本书章节概览 | 14 |
| 参考文献 | 14 |
| 第 2 章 导航数学基础、坐标系和地球几何学 | 17 |
| 2.1 导航基本数学基础 | 17 |
| 2.1.1 矢量记法 | 17 |
| 2.1.2 矢量坐标变换 | 17 |
| 2.1.3 角速度矢量 | 18 |

| | | |
|---------------------|---------------------------|-----------|
| 2.1.4 | 反对称矩阵 | 19 |
| 2.1.5 | 反对称矩阵的基本性质 | 19 |
| 2.1.6 | 角速度的坐标变换 | 19 |
| 2.1.7 | 最小二乘法 | 19 |
| 2.1.8 | 非线性函数的线性化 | 20 |
| 2.2 | 坐标系 | 21 |
| 2.2.1 | 地心惯性坐标系 | 21 |
| 2.2.2 | 地心地固坐标系 | 22 |
| 2.2.3 | 当地水平坐标系 | 23 |
| 2.2.4 | 游动坐标系 | 23 |
| 2.2.5 | 计算坐标系 | 24 |
| 2.2.6 | 载体坐标系 | 24 |
| 2.2.7 | 轨道坐标系 | 26 |
| 2.3 | 坐标变换 | 26 |
| 2.3.1 | 欧拉角和基本变换矩阵 | 27 |
| 2.3.2 | ECI 坐标系与 ECEF 坐标系的变换 | 30 |
| 2.3.3 | LLF 坐标系与 ECEF 坐标系的变换 | 30 |
| 2.3.4 | LLF 坐标系与游动坐标系的变换 | 31 |
| 2.3.5 | ECEF 坐标系与游动坐标系的变换 | 32 |
| 2.3.6 | 载体坐标系与 LLF 坐标系的变换 | 33 |
| 2.3.7 | 载体坐标系到 ECI 坐标系及 ECEF 的变换 | 33 |
| 2.3.8 | 变换矩阵的微分计算 | 34 |
| 2.3.9 | 惯性坐标系中位置矢量的微分 | 35 |
| 2.3.10 | 惯性坐标系速度矢量的微分 | 35 |
| 2.4 | 地球几何学 | 36 |
| 2.4.1 | 基本概念 | 36 |
| 2.4.2 | 卯酉半径与子午半径 | 37 |
| 2.5 | ECEF 坐标系的类型 | 38 |
| 2.5.1 | ECEF 坐标系中的笛卡儿坐标系 | 38 |
| 2.5.2 | ECEF 坐标系中的大地坐标系 | 39 |
| 2.5.3 | ECEF 坐标系中,大地坐标系到笛卡儿坐标系的变换 | 39 |
| 2.5.4 | ECEF 坐标系中,笛卡儿坐标系到大地坐标系的变换 | 39 |
| 2.6 | 地球引力场 | 40 |
| | 参考文献 | 49 |
| 第 3 章 全球定位系统 | | 50 |
| 3.1 | GPS 观测量 | 50 |

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 3.1.1 | 伪距观测量 | 51 |
| 3.1.2 | 载波相位观测量 | 51 |
| 3.1.3 | 多普勒频移观测量 | 52 |
| 3.2 | GPS 体系结构 | 52 |
| 3.2.1 | 空间星座部分 | 53 |
| 3.2.2 | 地面监控部分 | 53 |
| 3.2.3 | 用户设备部分 | 54 |
| 3.3 | GPS 信号 | 54 |
| 3.3.1 | 传统的 GPS 信号 | 54 |
| 3.3.2 | GPS 现代化 | 55 |
| 3.4 | GPS 误差源 | 56 |
| 3.4.1 | 卫星时钟钟差 | 56 |
| 3.4.2 | 接收机时钟钟差 | 56 |
| 3.4.3 | 电离层延时 | 57 |
| 3.4.4 | 对流层延时 | 58 |
| 3.4.5 | 多径误差 | 58 |
| 3.4.6 | 卫星轨道误差 | 59 |
| 3.4.7 | 接收机噪声 | 59 |
| 3.4.8 | 用户等距误差 | 59 |
| 3.5 | GPS 增强系统 | 59 |
| 3.5.1 | 差分 GPS | 60 |
| 3.5.2 | 局域差分 GPS | 60 |
| 3.5.3 | 广域差分 GPS | 61 |
| 3.5.4 | 辅助 GPS | 62 |
| 3.6 | GPS 卫星轨道 | 64 |
| 3.6.1 | 开普勒定律 | 64 |
| 3.6.2 | 开普勒轨道参数 | 64 |
| 3.6.3 | GPS 轨道参数 | 66 |
| 3.7 | 星历数据处理 | 67 |
| 3.7.1 | 卫星时钟修正值的计算 | 68 |
| 3.7.2 | 大气层误差修正 | 68 |
| 3.7.3 | 卫星位置的计算 | 72 |
| 3.7.4 | 卫星速度的计算 | 74 |
| 3.8 | 接收机的位置与速度估计 | 74 |
| 3.8.1 | 伪距测量 | 74 |
| 3.8.2 | 位置估算 | 75 |

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 3.8.3 | 卫星几何精度因子 | 77 |
| 3.8.4 | 多普勒测量 | 80 |
| 3.8.5 | 基于多普勒的速度测量 | 81 |
| 3.8.6 | 位置与速度估计 | 82 |
| 3.9 | 载波相位定位 | 84 |
| 3.9.1 | 相对定位和 GPS 观测量的线性组合 | 84 |
| 3.9.2 | 相对定位 | 85 |
| 3.9.3 | GPS 观测量的线性组合 | 86 |
| 3.9.4 | 载波相位观测量的位置估算 | 89 |
| 3.10 | 整周模糊度 | 91 |
| 3.10.1 | 整周模糊度解算 | 92 |
| 3.10.2 | 模糊度精度因子 | 92 |
| | 参考文献 | 93 |
| 第 4 章 | 惯性导航系统 | 95 |
| 4.1 | 惯性导航原理 | 95 |
| 4.2 | INS 的物理实现 | 96 |
| 4.3 | 惯性测量单元 | 97 |
| 4.4 | 惯性传感器 | 98 |
| 4.4.1 | 加速度计 | 98 |
| 4.4.2 | 陀螺仪 | 99 |
| 4.5 | 惯性导航的基本知识 | 100 |
| 4.5.1 | 一维惯性导航 | 100 |
| 4.5.2 | 二维惯性导航 | 101 |
| 4.6 | 三维惯性导航 | 103 |
| 4.7 | 三维 INS 概述 | 103 |
| 4.8 | 惯性传感器的理论测量 | 104 |
| 4.8.1 | 静态三轴加速度的理论测量 | 104 |
| 4.8.2 | 静态三轴陀螺仪的测量原理 | 105 |
| 4.8.3 | 运动三轴陀螺仪的测量原理 | 107 |
| 4.9 | 惯性传感器测量的注意事项 | 110 |
| 4.10 | 惯性传感器的性能特点 | 110 |
| 4.11 | 惯性传感器误差 | 111 |
| 4.11.1 | 系统误差 | 111 |
| 4.11.2 | 随机误差 | 114 |
| 4.11.3 | 随机误差要点 | 114 |

| | | |
|--------------|-----------------|------------|
| 4.11.4 | 传感器误差的数学模型 | 115 |
| 4.12 | 惯性传感器分类 | 116 |
| 4.12.1 | 陀螺仪技术及其应用 | 117 |
| 4.12.2 | 加速度计技术及其应用 | 117 |
| 4.13 | 惯性传感器校准 | 117 |
| 4.13.1 | 六位置静态测试 | 118 |
| 4.13.2 | 角速率测试 | 120 |
| 4.14 | 惯性传感器校准的重要性 | 120 |
| 4.14.1 | 情况 I:加速度计零偏 | 121 |
| 4.14.2 | 情况 II:陀螺仪漂移 | 121 |
| 4.15 | 惯性传感器的初始化及其对准 | 122 |
| 4.15.1 | 位置速度初始化 | 122 |
| 4.15.2 | 姿态对准 | 123 |
| | 参考文献 | 125 |
| 第 5 章 | 惯性导航系统建模 | 126 |
| 5.1 | 动力学建模 | 126 |
| 5.2 | 运动学建模 | 126 |
| 5.2.1 | 刚体运动建模 | 127 |
| 5.2.2 | 可观测量 | 128 |
| 5.3 | 惯导机械编排 | 128 |
| 5.3.1 | 惯性参考系中的惯导机械编排 | 128 |
| 5.3.2 | ECEF 系中的惯导机械编排 | 130 |
| 5.3.3 | 当地水平坐标系中的惯导机械编排 | 131 |
| 5.3.4 | 游动坐标系中的惯导机械编排 | 136 |
| 5.4 | 旋转矩阵的参数化 | 138 |
| 5.4.1 | 求解转换矩阵 | 138 |
| 5.4.2 | 四元数法 | 140 |
| 5.4.3 | 四元数方程求解 | 142 |
| 5.4.4 | 四元数的优势 | 143 |
| 5.5 | l 系中导航参数的解算步骤 | 144 |
| 5.5.1 | 原始测量数据 | 145 |
| 5.5.2 | 测量数据的修正 | 145 |
| 5.5.3 | 旋转矩阵的计算与更新 | 146 |
| 5.5.4 | 姿态解算 | 148 |
| 5.5.5 | 速度解算 | 148 |

| | | |
|--------------|--------------------|------------|
| 5.5.6 | 位置解算 | 149 |
| 附录 A | | 149 |
| 参考文献 | | 150 |
| 第 6 章 | 线性状态方程的误差模型 | 151 |
| 6.1 | 地理坐标系误差状态方程 | 152 |
| 6.1.1 | 地理坐标系的位置误差 | 152 |
| 6.1.2 | 地理坐标系的速度误差 | 155 |
| 6.1.3 | 地理坐标系的姿态误差 | 161 |
| 6.1.4 | 惯性传感器误差 | 165 |
| 6.1.5 | 地理坐标系误差状态方程总结 | 166 |
| 6.2 | 舒拉效应 | 168 |
| 6.2.1 | 东向通道误差模型 | 168 |
| 6.2.2 | 北向通道误差模型 | 169 |
| 6.2.3 | INS 误差分析 | 170 |
| 参考文献 | | 171 |
| 第 7 章 | 卡尔曼滤波 | 172 |
| 7.1 | 离散卡尔曼滤波 | 173 |
| 7.1.1 | KF 假设 | 174 |
| 7.2 | KF 过程 | 175 |
| 7.2.1 | 预报或时间更新 | 175 |
| 7.2.2 | 量测更新或修正 | 176 |
| 7.3 | KF 算法步骤 | 178 |
| 7.4 | 非线性卡尔曼滤波 | 179 |
| 7.4.1 | 线性卡尔曼滤波 | 180 |
| 7.4.2 | 扩展卡尔曼滤波 | 180 |
| 7.5 | KF 奇异值控制 | 181 |
| 7.5.1 | KF 过程模型引入虚拟噪声 | 181 |
| 7.5.2 | Schmidt Epsilon 技术 | 181 |
| 7.5.3 | 有限记忆滤波 | 181 |
| 7.5.4 | 衰减记忆滤波 | 182 |
| 7.6 | 实例说明 | 182 |
| 7.6.1 | 简单导航实例 | 182 |
| 7.6.2 | 零速度更新 | 183 |
| 7.6.3 | 坐标更新 | 185 |
| 参考文献 | | 186 |

| | |
|--|-----|
| 第 8 章 INS/GPS 组合 | 188 |
| 8.1 误差反馈方案 | 189 |
| 8.1.1 开环 INS/GPS 结构 | 189 |
| 8.1.2 闭环 INS/GPS 结构 | 189 |
| 8.2 组合的类型 | 190 |
| 8.2.1 INS/GPS 松组合 | 190 |
| 8.2.2 INS/GPS 紧组合 | 191 |
| 8.2.3 INS/GPS 超紧组合 | 191 |
| 8.3 INS 方程的误差模型 | 192 |
| 8.4 INS/GPS 松组合模型 | 194 |
| 8.4.1 系统模型 | 194 |
| 8.4.2 测量模型 | 195 |
| 8.5 INS/GPS 紧组合模型 | 197 |
| 8.5.1 系统模型 | 197 |
| 8.5.2 量测模型 | 200 |
| 8.5.3 整体量测模型 | 206 |
| 参考文献 | 207 |
| 第 9 章 陆用载体三维简化 INS/GPS 组合 | 209 |
| 9.1 采用 MEMS 级全惯性测量单元的三维定位性能分析 | 209 |
| 9.2 基于陆用载体 MEMS 惯性测量部件缺点的改进技术 | 210 |
| 9.3 三维简化惯性传感系统(RISS) | 211 |
| 9.3.1 三维 RISS 的概述 | 211 |
| 9.3.2 三维 RISS 用于轮式陆基运载体的优势 | 212 |
| 9.3.3 三维 RISS 运动方程的推导 | 214 |
| 9.3.4 三维 RISS 运动模型的概述 | 218 |
| 9.4 三维 RISS/GPS 的 KF 松组合 | 219 |
| 9.4.1 三维 RISS 的线性误差模型 | 220 |
| 9.4.2 更新三维 RISS 的量测模型 | 221 |
| 9.5 三维 RISS/GPS 的 KF 紧组合 | 222 |
| 9.5.1 组合型系统模型 | 223 |
| 9.5.2 更新三维 RISS 的 GPS 量测模型 | 223 |
| 参考文献 | 227 |

第 10 章 两个案例:全 IMU/GPS 和三维 RISS/GPS 组合 228

- 10.1 用于实验的导航设备 228
 - 10.1.1 GPS 信号部分中断选定 230
- 10.2 全 IMU/GPS 紧组合算法的性能分析 230
 - 10.2.1 所选的 GPS 信号中断分析 233
- 10.3 三维 RISS/GPS 紧组合的性能 236
 - 10.3.1 所选的 GPS 信号中断分析 238
- 参考文献 242

附录 英语缩略语 243

第1章 绪 论

导航一词源于拉丁文 *Navigare* (*Navis* 表示船, *Agere* 表示引导), 原义为“引导船舶航行”(Esmat, 2007)。早期的导航主要应用于海上交通, 目前已渗透到各式各样的运载器及其他应用领域, 如定位服务、搜索救援、执法维权、陆空交通、远程物流跟踪、舰队管理、情报收集、体育运动、公共安全及环境评估与规划等, 为其提供相应的导航服务(El - Rabbany, 2002)。随着微电子技术和集成电路小型化的发展, 降低了惯性器件、全球定位系统(GPS)接收机、计算机的生产成本, 使得导航系统在低成本领域具有广阔的应用前景。

导航是一种在已知参考系下, 提供运动平台位置、速度及姿态信息的技术(Groves, 2007)。导航系统既可以自主工作, 也可以依靠外部信息, 在某些情况下还可以依靠两者的组合。通常情况下, 两种方式的组合导航系统需要应用卡尔曼滤波技术, 此技术在 1960 年发展成熟并成功应用于空间导航领域。在导航系统中, 常用的传感器主要有加速度计、陀螺仪及无线电接收机等。导航的基本形式有两种: 位置定位和航迹推算(DR)。位置定位主要依靠外部已知的位置信息, GPS 是此方式的典型应用; 航迹推算是一种自主式导航, 只需已知位置、速度、航向等初始的信息即可。惯性导航系统(INS)就是基于航迹推算法, 利用加速度计和陀螺仪分别测出运载体平移与旋转参数, 来实现导航功能。

导航的基本参数主要由位置、速度、姿态角组成。如果仅仅包含位置参数, 只能称为定位, 而不是导航。本书所涉及的运载器都是由位置和姿态共同决定的。

1.1 常用的定位技术分类

由 Borenstein 等于 1997 指出的定位技术(室内和室外)主要分为 2 类, 共有 7 种定位形式。

1.1.1 相对测量技术(航迹推算法)

1.1.1.1 计程仪

传感器(如高分辨率编码器)通过监测车轮转向和转动信息, 并将车轮转动表征为直线运动信息来获得计程仪的数据。此种方法具有短程精度高、成本低、采样率高等优点, 但忽略了车轮滑动的影响。在给定初始估计位置后, 它会随时间不断地累积运动增量完成位置解算。但它的缺点是任意小的常量误差都会累积发散。

需要提及的是,随着行驶距离的增加,方位误差也会产生很大的行程误差,从而降低系统的长时精度。

1.1.1.2 惯性导航

通过惯性器件陀螺仪和加速度计分别测得运载体的旋转角速度和比力,加速度由比力求解得到。惯性导航系统是自主式的,具有完全独立的工作特性,不需要参考外部信息。已知初始方位和位置,然后对陀螺仪观测量进行一次积分,对加速度计观测量进行二次积分,即可得到当前的方位与位置。定位结果由时间连续积分得到,因而误差也会不断积累。所以,INS 单独工作时,特别是集成低精度惯性器件的系统,不适用于长时间精确的导航领域。

1.1.2 绝对测量技术(参考基准法)

1.1.2.1 电子罗盘

尽管本身不能提供定位信息,但可以在当地磁场范围内,利用磁力计测量出相对地球磁北的航向信息。利用磁偏角(地北与磁北的夹角)将罗盘方向转换为真北方向。磁偏角与位置有关,因此,为了得到相对地北准确的方向,必须已知罗盘所在位置。而且,当地磁场由于电源线或金属结构(如船舶航行遇到的桥或建筑)的影响会发生扭曲,将导致罗盘测向产生甚至是不可预见的误差,这就是磁罗盘导航的缺点,也是此系统在载体导航应用领域的问题所在。

1.1.2.2 导航灯塔

在已知区域内,可以采用此方法为运动平台提供精确的导航定位信息。然而,为保证定位精度,需要精确地架设灯塔。此外,灯塔安装及维护费用相对昂贵,这就限制了在特定环境下导航灯塔的使用。在导航灯塔系统中,常用的定位算法有测距算法、测向算法及指纹识别算法。测距算法通过测量运载体相对灯塔的距离实现定位,如飞行时间系统。测向算法通过测量运载体纵轴相对灯塔的角度得到位置与方位信息。无线电导航定位就是导航灯塔系统的实例,例如:移动网络、电视网络、宽带网络、无线局域网(Wi-Fi 系统)等。

1.1.2.3 全球导航卫星系统(GNSS)

GNSS 是一种重要的户外导航技术。当前流行的是 GPS,是一个由卫星星座发射调制高频信号来实现定位的系统。GPS 采用测距算法实现定位,地面接收机利用信号传播时间与卫星当前的空间位置(包含在播发信号中)计算出位置信息。计算接收机的经纬高信息需要已知一定数目的卫星,理论上最小值为 3 个,如果已知第 4 颗卫星信息,就可以计算出接收机的卫星钟差。在户外导航领域,如果有足够的卫星覆盖范围,GPS 可提供绝对的位置定位,但在室内导航应用中是不理想的。

1.1.2.4 地标导航

在已知区域内,可以采用此方法为运动平台提供精确的导航定位信息。地标

应具有明显的外形和特征,如几何形状可以利用运载体上的相关仪器很容易地区分和检测出来。它们既可以是天然的,也可以是人造的。人造地标是在特定环境下为实现定位与导航设定的,天然地标是已存在自然环境中的。每个地标的位置都是确定的,运载体需要掌握包含有关地标位置与特征的数据库。有些地标甚至还包含额外的信息(如条形码等)。运载体必须通过传感器有效检测到地标后,通过查询手册数据库,才能实现自主定位。

1.1.2.5 地图定位(模式匹配)

在已知地图区域内,可以采用此方法为运动平台提供精确的导航定位信息。此方法中,运动平台利用仪器感知当地环境,与存储的地图信息进行匹配,如果匹配成功,就可以在这个特定环境中计算出自己的位置与方位信息。摄像机和激光测距仪是此方法常用的定位传感器。存储的地图环境信息既可以是事先有效的建模,也可以由以往的仪器数据构建而成。此方法只适用于已知区域,比如室内和一些特定的户外环境。与地图匹配类似的技术是结合 GPS 实现道路网内的车辆定位。尽管两者具有相似性,但后者还需依靠其他定位技术(如 GPS),已不再是独立的定位技术,因而在此不进行讨论。

1.1.3 组合系统

第一类为相对测量技术(航迹推算法),已知前一时刻的位置与运动状态的测量信息,推算出当前时刻的位置。第二类为绝对测量技术(参考基准法),不需要已知前一时刻的位置,只需测量与已知参考点的相互关系就可以实现定位。但是通常情况下,为了获得更准确的导航结果,一般采取两类(或更多)技术中的不同方式进行组合来实现有效地导航。

1.2 全球导航卫星系统技术

GNSS 用于户外定位,当前流行的是 GPS。利用测距算法,已知一定数目的可见卫星位置就可实现对接收机的定位。现今,美国的 GPS 已经得到了广泛应用。另一个导航系统是俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS),采用与 GPS 相同的原理,但运用不同的技术标准设计而成,在 1982 年,成功发射第一颗导航卫星。与 GPS 相仿,GLONASS 也提供民用定位导航服务和军用加密服务(Space - Based Positioning, Navigation and Timing, 2008)。到目前为止,在太空中已经有 31 颗卫星,其中有 24 颗处于运行状态(FSA, 2012)。

欧盟研制了伽利略的导航系统,在 2005 年 12 月成功发射了第一颗实验卫星,第二颗于 2008 年 04 月发射,主要完成分频与其他重要技术的测试。在 2011 年 10 月发射了 2 颗运行卫星,在 2012 年里,会陆续发射更多的卫星升空。此系统预计在 5 年内实现试运行(IOC),10 年内实现全面运行(FOC)(ESA, 2012)。伽利略导

航系统为民用服务提供两种服务模式,至少有一种将会对用户免费使用,最终的卫星星座将达到 30 颗。

中国研制的实验性卫星导航系统名为“北斗”1号(BD-1),中国称为北斗导航卫星实验系统。由中国航空科学与技术(CASC)的下属单位中国空间技术研究院(CAST)研制而成。此系统在东亚区域内可实现军民两用的全天候、二维定位、导航与通信等功能。它包含2颗“北斗”1号卫星和1颗备用卫星。在2003年5月,第三颗卫星发射成功,系统进入全面运行状态(BD-1 2012)。北斗导航卫星系统(CNSS)或北斗2号(BD-2)作为全面导航系统正在研制之中,它将由25~35颗卫星组合的卫星星座组成。其中包括4颗同步卫星(译者注:现今已有5颗同步卫星),可以全面覆盖地球每个角落(BD-2 2012)。免费服务可以提供10m的精度,而授权服务的精度将会更高。

印度和日本也正在研制基于卫星的导航系统,分别称为印度区域导航卫星系统(IRNSS)和准天顶卫星系统(QZSS)。

最初于1973年研制的GPS,现今已经相对成熟,并发展为最流行的卫星导航系统,本书将以它作为讨论的重点。

1.2.1 全球定位系统

美国海军报道,在1961年发射的实验传输卫星标志着世界上第一个导航卫星系统的诞生。在1964年,此系统开始运行,但GPS结构的研制是在1973年开始的,并在1993年开始试运行。系统为持有GPS接收机的用户提供全世界免费的准确定位、导航和授时服务,但是起初军用服务的定位精度高于民用服务。

GPS包含24颗在轨卫星组成的卫星星座(图1.1),为容纳更多的卫星,将平均轨道半径定为26km,560km(Misra and Enge, 2001)。卫星星座这种几何构造保证了在地球的任何位置都能至少接收到4颗可见卫星的信息,满足定位实现的最小数量要求。原则上,依据测距算法,接收机只需3颗卫星就能够实现三维定位,但仍需要第4颗卫星估算出系统时钟与接收机时钟的钟差。图1.2所示为3颗卫星实现GPS定位的原理。事实上,为提高定位精度,需要多于4颗卫星的信息支持。本书将在第3章对GPS系统做详细论述。

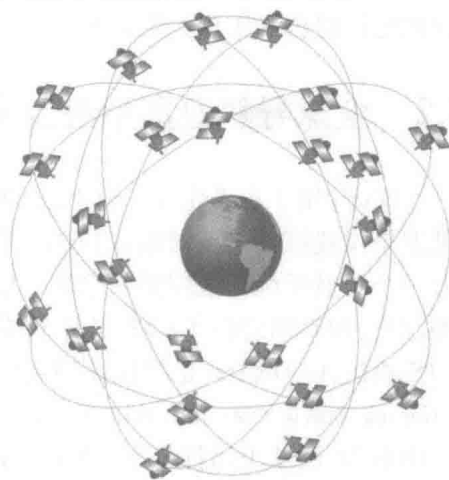


图 1.1 GPS 卫星星座图

GPS(包括全部的GNSS)会由于信号中断、多径效应、信号干扰或遮挡等影响发生GPS中断的现象。GPS中断常发生在城市峡谷、隧道和其他GPS屏蔽环境