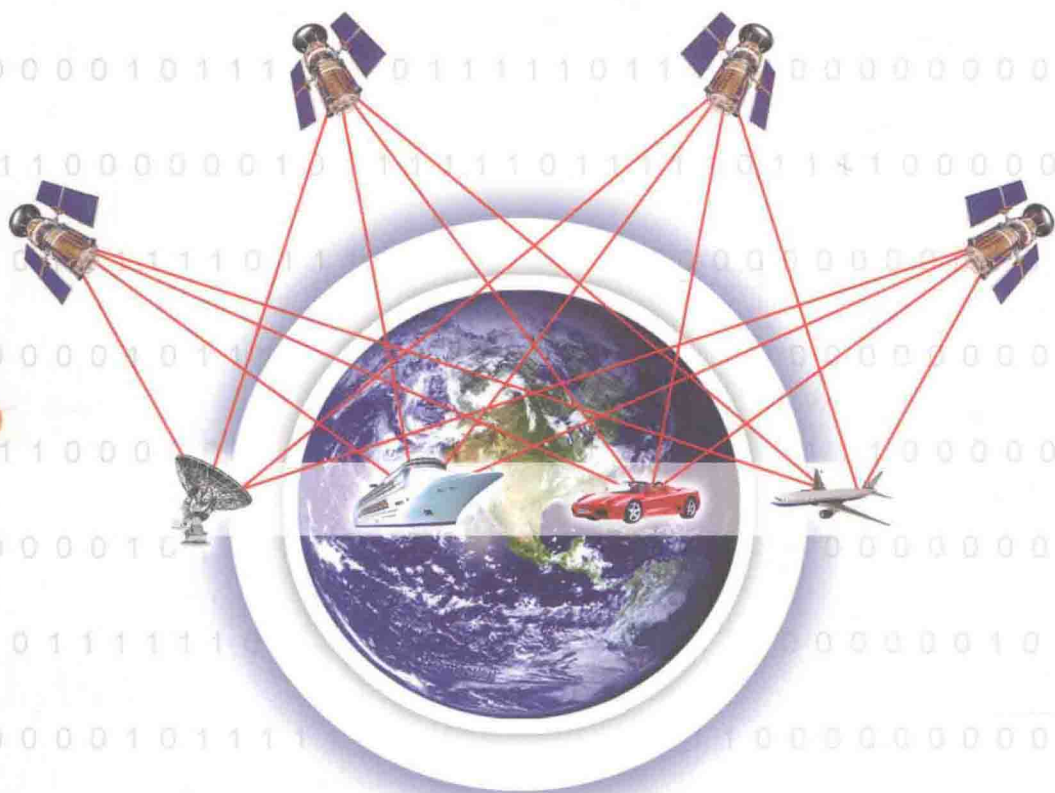


高等学校
测绘工程专业核心课程规划教材

卫星导航定位原理

黄丁发 张勤 张小红 周乐韬 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校
测绘工程专业核心课程规划教材

卫星导航定位原理

黄丁发 张勤 张小红 周乐韬 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位原理/黄丁发等编著. —武汉:武汉大学出版社,2015. 1
高等学校测绘工程专业核心课程规划教材
ISBN 978-7-307-14917-5

I. 卫… II. 黄… III. 卫星导航—全球定位系统—高等学校—教材
IV. ①TN967.1 ②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 275337 号



责任编辑:黄汉平 责任校对:汪欣怡 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:黄石市华光彩色印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:449千字 插页:1

版次:2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-14917-5 定价:38.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

卫星导航定位原理是测绘类本科专业的一门核心专业基础课程，随着导航卫星系统(GNSS)的快速发展，特别是我国北斗导航卫星系统的日益成熟，目前已形成GPS、GLO-NASS、北斗和Galileo四大系统的局面。GNSS以全新的姿态、广泛的应用前景吸引着全世界的关注，多模互用成为卫星导航定位的发展方向。

为了满足测绘和地理信息类专业教学的要求，教育部高等学校测绘学科教学指导委员会在全国范围内组织出版一批核心教材。本书作为卫星导航定位课程的核心教材，由高等学校测绘学科教学指导委员会确定主编，并审定教材编写大纲和目录。为了满足GNSS卫星导航定位技术发展的需要，在编者原有GPS讲义/教材的基础上，增加北斗、GLO-NASS、Galileo等的内容，系统地介绍GNSS卫星导航定位的基本理论和最新进展。本书凝结了来自数所大学长期在教学第一线教师的经验，结合多年的教学实践和科学研究经历，理论与实际应用相结合，详细地论述了GNSS的基本原理。全书共分10章，内容包括：全球导航卫星系统概论，坐标与时间系统，卫星信号结构，卫星轨道运动，基本观测值与误差分析，单点(绝对)定位原理，差分(相对)定位原理，基线数据处理模型，控制网建网与网平差，参考站网络系统等。

本书由黄丁发负责大纲的起草、全书修订与统稿。从构思到编写，得到了教育部高等学校测绘学科教学指导委员会专家的指导；编审委员会成员对编写大纲和内容的制订提出了非常好的建设性意见与建议。本书由西南交通大学黄丁发教授、周乐韬副教授(第1章，第7章部分，8，9，10章)，长安大学张勤教授、王利副教授(第2，3，4章)，武汉大学张小红教授(第5，6章，第7章部分)等具体负责编写。参加本书修编的还有西南交通大学冯威和龚晓颖老师。博士研究生李萌、张熙、朱东伟、熊菠林等对本书进行了编辑和校对。另外，在大纲编写及讨论过程中，同济大学沈云中教授、西南交通大学熊永良教授、中国地质大学胡友健教授、河海大学何秀凤教授、昆明理工大学方源敏教授、北京建筑大学罗德安教授、成都理工大学余代俊教授以及西南科技大学李玉宝教授等专家提出了很多宝贵的意见和建议。特别感谢武汉大学出版社王金龙先生对本书出版所付出的大量工作，在此一并表示衷心的感谢！

GNSS卫星导航定位理论与方法的发展日新月异，编者虽力求系统而全面，但书中错误与不妥之处在所难免，恳切希望得到同行专家、学者及广大读者的批评指正。

编 者

2014年8月

目 录

第 1 章 全球导航卫星系统概论	1
1.1 无线电定位的基本方法	1
1.1.1 测边交会定位	1
1.1.2 双曲线定位	2
1.1.3 多普勒定位	2
1.2 GPS 系统	3
1.2.1 系统组成	5
1.2.2 系统特点	5
1.2.3 系统的现代化计划	7
1.3 GLONASS 系统	7
1.3.1 系统概述	8
1.3.2 系统结构	9
1.3.3 系统现代化计划	10
1.4 北斗导航卫星系统(BDS 系统)	10
1.4.1 系统概述	11
1.4.2 系统组成	12
1.4.3 系统服务	12
1.4.4 系统的发展状况	13
1.5 Galileo 系统	14
1.5.1 系统概述	14
1.5.2 系统结构和组成	14
1.5.3 系统服务与预期性能	16
1.5.4 系统开发计划	17
第 2 章 坐标与时间系统	18
2.1 天球坐标系与地球坐标系	18
2.1.1 天球概述	18
2.1.2 天球坐标系及其转换模型	20
2.1.3 极移与国际协议地极原点	23
2.1.4 地球坐标系及其转换模型	24
2.1.5 瞬时极(真)天球坐标系到瞬时极(真)地球坐标系的转换模型	26
2.2 几种常用坐标系	28

2.2.1	国际地球参考框架(ITRF)	28
2.2.2	GPS系统的WGS-84大地坐标系	28
2.2.3	GLONASS系统的PZ-90大地坐标系	29
2.2.4	Galileo系统的GTRF大地坐标系	30
2.2.5	北斗系统的CGCS2000(国家大地坐标系)	30
2.2.6	空间直角坐标系间的转换	31
2.3	时间系统	32
2.3.1	世界时系统	32
2.3.2	原子时(Atomic Time, AT)	33
2.3.3	力学时(Dynamic Time, DT)	34
2.3.4	协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)	35
2.3.5	GPS时间系统(GPST)	35
2.3.6	GLONASS时间系统(GLONASST)	36
2.3.7	GALILEO时间系统(GST)	37
2.3.8	北斗时间系统(The BeiDou Time)	37
2.4	时间标示法	37
2.4.1	历法(Calendar)	37
2.4.2	儒略日(Julian Day)	38
2.4.3	简化儒略日(Modified Julian Day)	38
2.4.4	GPS时(GPS Time)	39
2.4.5	年积日(Day of Year)	39
第3章	卫星信号的结构	40
3.1	码分多址与频分多址概述	40
3.2	GPS卫星信号	40
3.2.1	载波频率	42
3.2.2	PRN码和信号调制	42
3.2.3	导航电文	46
3.3	Galileo卫星信号*	50
3.3.1	载波频率	51
3.3.2	伪随机码和信号调制	53
3.3.3	导航电文	57
3.4	北斗卫星信号	59
3.4.1	载波频率	60
3.4.2	伪随机码和信号调制	60
3.4.3	导航电文	62
3.5	GLONASS卫星信号	67
3.5.1	载波频率	68
3.5.2	伪随机码和调制	69

3.5.3 导航电文	71
第4章 卫星轨道运动理论	73
4.1 概述	73
4.2 正常卫星轨道	73
4.2.1 二体问题下的卫星运动方程	74
4.2.2 开普勒定律和卫星轨道参数	75
4.2.3 卫星的瞬时位置计算	76
4.2.4 卫星的瞬时速度计算	79
4.3 摄动卫星轨道	80
4.3.1 卫星运动的摄动力和受摄运动方程	80
4.3.2 地球引力场摄动力及其对卫星轨道运动的影响	82
4.3.3 日、月引力摄动	84
4.3.4 太阳光压摄动	85
4.3.5 其他摄动力影响	86
4.4 卫星星历与坐标计算	86
4.4.1 GPS 卫星的广播星历与坐标计算	87
4.4.2 GLONASS 卫星的广播星历与坐标计算	91
4.4.3 BDS 卫星的广播星历与坐标计算	93
4.4.4 精密星历与坐标计算	95
4.5 卫星可视性预报	100
4.5.1 卫星可视性预报的基本流程	100
4.5.2 GPS 卫星可视性预报实例	102
第5章 基本观测值与误差分析	106
5.1 基本观测值	106
5.1.1 测码伪距观测值	106
5.1.2 载波相位观测值	108
5.1.3 多普勒频移测量值	112
5.1.4 观测值误差	113
5.2 与卫星有关的误差	114
5.2.1 卫星钟差	114
5.2.2 卫星硬件延迟*	116
5.2.3 卫星星历误差	119
5.2.4 相对论误差*	120
5.2.5 卫星天线偏差	125
5.3 与信号传播有关的误差	127
5.3.1 电离层延迟误差	127
5.3.2 对流层延迟误差	135

5.3.3 多路径误差	145
5.4 与接收机相关的误差	148
5.4.1 接收机钟差	148
5.4.2 接收机硬件延迟*	149
5.4.3 接收机天线偏差*	150
5.4.4 接收机噪声	151
5.5 其他误差*	152
5.6 观测值的线性组合	155
5.6.1 组合标准	155
5.6.2 宽巷组合	156
5.6.3 窄巷组合	156
5.6.4 无电离层组合(Ionosphere-free combination)	157
5.6.5 几何无关组合(Geometry-free)	158
5.6.6 Melbourne-Wübbena 组合	158
第6章 单点(绝对)定位	159
6.1 单点(绝对)定位的观测方程	159
6.1.1 标准单点定位观测方程	159
6.1.2 精密单点定位观测方程	160
6.2 单点(绝对)定位的数据处理	160
6.2.1 标准单点定位数据处理	161
6.2.2 精度评定	165
6.3 速度测量与时间传递	167
6.3.1 速度测量	167
6.3.2 时间传递	171
6.4 精密单点定位(PPP)技术简介*	173
6.4.1 精密单点定位基本原理	173
6.4.2 精密单点定位主要误差源及其改正模型	175
6.4.3 精密单点定位的技术优势	175
6.4.4 精密单点定位中的坐标框架	176
6.4.5 精密单点定位技术的应用前景	176
第7章 差分(相对)定位	178
7.1 差分(相对)定位概论	178
7.1.1 基本概念	178
7.1.2 差分定位的分类	179
7.2 差分定位的方法	182
7.2.1 坐标(位置)域差分	182
7.2.2 观测值(距离)域差分	183

7.2.3 广域差分	184
7.3 差分改正数计算	184
7.3.1 坐标差分改正数计算	184
7.3.2 距离差分改正数计算	185
7.3.3 局域差分改正数计算*	186
7.3.4 广域差分改正数计算*	186
7.3.5 流动站数据处理	187
7.4 数据传输标准	188
7.4.1 RTCM-SC-104 传输格式	188
7.4.2 NMEA-0183 协议	190
7.5 静态相对定位原理	193
7.5.1 概述	193
7.5.2 基本的观测值组合	194
7.5.3 差分定位的观测方程	196
7.6 动态相对定位原理	198
7.6.1 概述	198
7.6.2 伪距观测动态相对定位	199
7.6.3 载波相位观测动态相对定位	201
第8章 基线数据处理模型	203
8.1 间接观测平差引论	203
8.2 基线解算的数学模型	204
8.2.1 单差模型	204
8.2.2 双差模型	206
8.2.3 三差模型	208
8.2.4 参考站坐标误差对基线解的影响	210
8.3 周跳探测与修复	211
8.3.1 检测周跳的观测量	211
8.3.2 多项式拟合法检测周跳	212
8.3.3 卡尔曼滤波法检测周跳	212
8.3.4 基于三差的选权迭代法	213
8.4 整周模糊度的解算与搜索技术	215
8.4.1 概述	215
8.4.2 模糊度搜索空间	217
8.4.3 模糊度搜索方法	218
8.4.4 整周模糊度显著性检验	219
第9章 GNSS 控制测量与网平差	221
9.1 控制网的技术设计	221

9.1.1	技术设计的依据	221
9.1.2	控制网精度及分布设计	221
9.1.3	基准设计	223
9.1.4	图形设计	224
9.2	GNSS 施测前的准备工作	229
9.2.1	测区踏勘及资料收集	229
9.2.2	选点及埋石	230
9.2.3	GNSS 接收机的选择与检验	232
9.2.4	观测计划的拟定	233
9.2.5	人员组织及后勤保障	233
9.3	GNSS 野外数据采集与处理	234
9.3.1	测量作业的基本技术规定	234
9.3.2	外业观测	235
9.3.3	基线数据处理与检核	237
9.4	GNSS 控制网平差	240
9.4.1	网平差的目的	240
9.4.2	网平差的类型	240
9.4.3	网平差的整体流程	241
9.5	GNSS 网的无约束平差	242
9.5.1	GNSS 基线向量	242
9.5.2	以空间直角坐标为未知参数的 GNSS 网三维平差	243
9.5.3	以大地坐标作为未知参数的 GNSS 网三维平差	244
9.6	GNSS 网的约束平差	245
9.6.1	三维约束平差	245
9.6.2	二维约束平差	247
9.6.3	单位权方差及检验	248
9.7	GNSS 高程测量	249
9.7.1	高程系统	249
9.7.2	大地水准面高的计算方法	250
9.7.3	地形起伏对大地水准面高计算的影响	255
第 10 章	GNSS 参考站网络系统	257
10.1	概述	257
10.1.1	国内外 GNSS 参考站网络的发展现状	257
10.1.2	网络 RTK 定位技术发展及其特点	258
10.2	GNSS 参考站网络 RTK 原理	259
10.2.1	VRS/RTK 的构成与工作流程	259
10.2.2	VRS 观测值推导	260
10.2.3	流动站双差方程的建立	261

10.3 网络 RTK 的解算模型*	262
10.3.1 参考站基线解算模型	262
10.3.2 空间相关误差及其标定方法	263
10.3.3 差分信息的生成与发布	266
10.4 典型 GNSS 参考站网络系统	269
10.4.1 VRS ³ Net 系统软件	270
10.4.2 SpiderNet 系统软件	270
10.4.3 GNSMART 系统软件	272
10.4.4 ARSNet 系统软件	272
10.5 GNSS 参考站网络的应用	273
10.5.1 精确位置服务、精确授时服务	274
10.5.2 气象监测、空间天气监测	274
10.5.3 GNSS 卫星精确定轨	275
10.5.4 地壳运动监测与地球动力学研究	276
参考文献	279

第 1 章 全球导航卫星系统概论

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)属于无线电定位系统,主要包括:美国的 GPS 系统(Global Positioning System, GPS),俄罗斯的 GLONASS 系统,中国的北斗系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS),以及欧盟正在建设的 GALILEO 系统。这些导航卫星系统在系统组成和定位原理方面大同小异。目前 GPS 应用最广,全球用户最多,并已广泛应用于诸多领域,因此 GPS 就成了 GNSS 的典型代表。为了更好地理解全球导航卫星系统,本章首先介绍卫星无线电定位的基本方法,然后介绍导航卫星定位系统的发展历程、系统结构、卫星信号,及其现代化计划等。

1.1 无线电定位的基本方法

无线电定位技术几乎同步用于导航和通信。最早的船只或飞机导航,通过定向天线量测到两个以上的无线电信标的方位来实现。无线电导航系统自第二次世界大战以来发展迅速,较有代表性的无线电导航系统有:伏加、塔康、仪表着陆系统,微波着陆系统等。这些陆基、短距离、视线系统只提供二维(平面)位置服务,能满足陆地或海上导航。但在众多应用领域需要三维位置服务,如:航空导航、勘测测绘、地图制图等领域;传统的测量技术手段将平面与高程分开处理。如今,利用导航卫星系统便可实现实时、高精度的三维定位。本章首先简要介绍无线电定位的三种方法,即测边交会定位、双曲线定位和多普勒定位,这些基本的方法实际上构成了卫星导航定位的基本原理。

1.1.1 测边交会定位

测边交会法,采用到达时间(Time of Arrival, TOA)方式,即利用测量待测点到多个已知点之间的距离,求得待测点坐标的方法。假定无线电波以恒定速度(光速 C)在空间传播,若测出信号发射台(S_i)和信号接收台(P)之间的传输时间为 τ ,则可得到发射台和待测点之间的真实距离 $R = C\tau$ 。如图 1.1 所示,如果待测点 P 到已知点 S_1 、 S_2 、 S_3 的真实距离为 R_1 、 R_2 、 R_3 ,那么待测点的位置必定在以 S_i 为圆心, R_i 为半径的三个球面相交的位置点 P 上,这就是待测点的位置,也是测边交会法的几何原理。GPS、GLONASS 和 GALILEO 等导航卫星定位系统的定位原理就是依据测边交会法建立

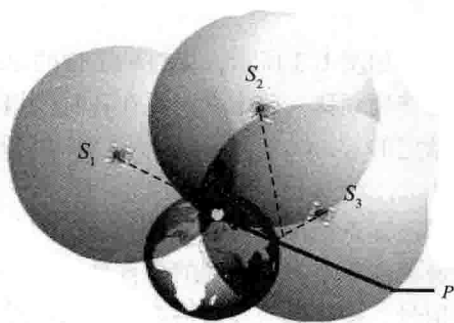


图 1.1 测边交会定位原理

的,而这个已知点就是卫星,待测点 P 就是接收机天线相位中心的位置。

$$R_i = \sqrt{(x^i - x)^2 + (y^i - y)^2 + (z^i - z)^2}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (1.1)$$

可见,只要对三个已知点 S_i 测量距离 R_i , 联立这样三个方程就可以解算出待定点 P 的坐标。

1.1.2 双曲线定位

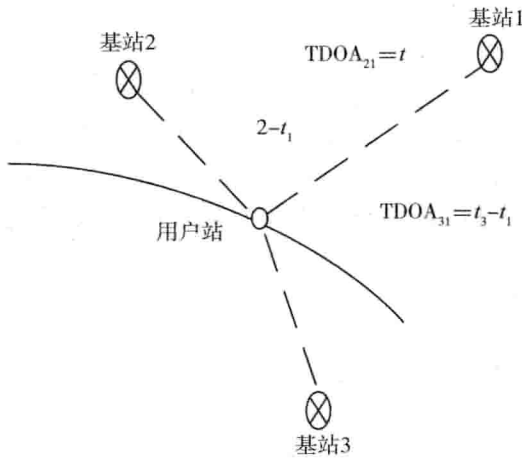


图 1.2 双曲线定位原理

双曲线定位,采用 Time Difference Of Arrival (TDOA) 的方式,其原理是通过测量无线电波到达两个基站的时间差来测定待测点的坐标。待测点必须位于以两个基站为焦点的双曲线上,确定待测点的二维位置坐标需要建立两个以上双曲线方程,两条双曲线的交点即为待测点的二维位置坐标。

如图 1.2 所示,在平面上,用户站到基站的距离差和基站之间的距离决定一条双曲线。同样,可以得到用户站与其他两个基站决定的另一条双曲线,用户站的位置同时处于这两条双曲线上,所以用户站的位置必定为这两条双曲线的交点。设 (x, y) 为待测点的待估坐标, (X_i, Y_i) 为第 $i(i = 1, 2, 3)$

个基站的已知位置,则待测点和第 i 个基站之间距离为:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (1.2)$$

那么测量的距离差为:

$$R_{21} = ct_{21} = R_2 - R_1 = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (1.3)$$

$$R_{31} = ct_{31} = R_3 - R_1 = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \quad (1.4)$$

对以上方程组进行求解,即可得到用户站的坐标 (x, y) 。利用双曲线原理建立的无线电导航系统有罗兰 A、罗兰 C、台卡和奥米伽等。

1.1.3 多普勒定位

如图 1.3 所示,多普勒定位的原理是通过测定同一信号发射源在不同间隔时段信号的多普勒频移,确定发射源在各时段相对于观察者的视向速度和视向位移,再利用发射源所给定的 $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$ 时刻的空间坐标,结合对应的视向位移,解算测站空间坐标 $P(X, Y, Z)$ 。发射源在 $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$ 时刻的坐标是已知的,视向位移为任意两个相邻已知点到待定点 P 的距离差,可根据发射源经过期间,发射源和观测点 P 之间的相对速度或距离改变引起的多普勒频移求得。设信号的发射频率为 f ,观测点信号接收机跟踪信号,接收机与发射器之间的相对运动 ds/dt 产生的接收频率 $f_s(t)$ 随时间变化的关系为:

$$f_s(t) = f \left(1 - \frac{1}{c} \cdot \frac{ds}{dt} \right) \quad (1.5)$$

这就是多普勒效应。给定时间间隔 (t_j, t_k) 观测到的频移, 通过积分转换为距离差值 Δr_p^{jk} 。与此相关的观测方程为:

$$\Delta r_p^{jk} = \int_{t_j}^{t_k} [f - f_s(t)] dt$$

$$\| \vec{r}^k - \vec{r}_p \| - \| \vec{r}^j - \vec{r}_p \| = \Delta r_p^{jk} \quad (1.6)$$

从数学上我们知道, 一个动点 P 到两定点的距离差为一定值时, 该动点 P 的轨迹处在一旋转双曲面上, 这两个定点就是该双曲面的焦点。于是以卫星所在的 $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$ 任意两个相邻已知定点作焦点, 未知点 P 作动点构成对应的四个特定的旋转双曲面。其中, 两个双曲面相交为一曲线 (P 点必在该曲线上), 曲线与第三个双曲面相交于两点 (其中一点必为 P 点), 第四个双曲面必与其中一点相交, 该点就是待定点 P 点。因此, 要解算 P 点的三维坐标, 必须对同一发射器有四个积分间隔时段的观测, 得出发射器在四个时段的视向位移, 从而获得四个旋转双曲面, 它们的公共交点就是待定点 $P(x, y, z)$ 。

利用多普勒定位原理的导航定位系统有 TANSIT 子午卫星系统、星载多普勒无线电定轨定位系统。

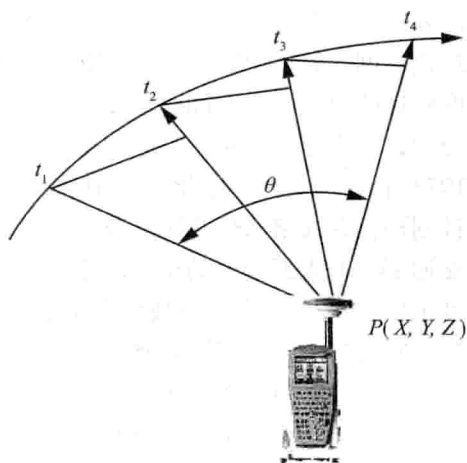


图 1.3 多普勒定位原理

1.2 GPS 系统

1957 年 10 月世界上第一颗卫星发射成功后, 科学家开始着手进行卫星定位和导航的研究工作。1958 年底, 美国海军武器实验室委托霍普金斯大学应用物理实验室, 研究美军用于舰艇导航服务的卫星系统, 即海军导航卫星系统 (Navy Navigation Satellite System, NNSS)。这一系统于 1964 年 1 月研制成功, 成为世界上第一个卫星导航系统。由于该系统的卫星轨道均通过地极, 因此又称为“子午卫星系统” (Transit)。利用该卫星定位系统, 不论在地球表面任何地方, 任何气候条件下, 一小时内均能测定其位置, 其定位精度根据卫星通过的观测次数可高可低 (1 ~ 500m)。

子午卫星系统 (Transit) 是世界上第一个导航卫星系统。该系统在美国海军授权下, 用于北极星核潜艇的导航定位, 并逐步用于各种水面舰艇的导航定位。1967 年 7 月, 经美国政府批准, 对其广播星历解密, 并提供民用, 为远洋船舶导航和海上定位服务。

Transit 系统采用 6 颗工作卫星, 主要参数: 卫星高度: 1000km; 卫星的运行周期: 107 分钟; 定位精度: 1 ~ 500m。

该系统存在着较大缺陷, 如: 卫星数目少, 可供观测的时间短, 因此观测所需等待卫星的时间偏长 (35 ~ 100 分钟), 如高精度定位要达到 1m, 需有效观测 40 次以上卫星通过 (数天), 且需精密星历等。这些都无法满足实时动态、高精度的定位需求。

20世纪60年代末,美国着手研制新的导航卫星系统,以满足军用和民用部门对导航的要求。为此美国海军提出了名为“Timation”的计划,该计划采用12~18颗卫星组成全球定位网,并于1967年5月31日和1969年9月30日分别发射了Timation-1和Timation-2两颗试验卫星。与此同时,美国空军提出了名为“621-B”的计划,采用3~4个星群覆盖全球,每个星群由4~5颗卫星组成。考虑到这两个计划的优缺点以及军费负担等原因,1973年12月17日美国国防部批准了建立新的导航卫星定位系统计划,为此成立了联合计划局,并在洛杉矶空军航空处内设立了由美国陆军、海军、海军陆战队、国防制图局、交通部、北大西洋公约组织和澳大利亚的代表组成的办事机构,开始进行系统的研究和论证工作。1978年第一颗试验卫星发射成功,1994年顺利完成24颗卫星的布设。这就是“导航卫星授时与测距全球定位系统”(Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System, NAVSTAR GPS),简称全球定位系统(GPS)。

GPS不仅集成了以前所有的单用途卫星系统,并且致力于更广泛的用途。该系统具有比其他导航系统优越的特点:①全能性:能在空中、海洋、陆地等全球范围内导航、授时、定位及测速;②全球性:在全球的任何地点都可进行定位;③全天候:一天24小时都可以工作。

GPS计划实施共分三个阶段:

第一阶段为方案论证和初步设计阶段:从1973年到1979年,共发射了4颗试验卫星,研制了地面接收机及建立地面跟踪网,从硬件和软件上进行了试验。试验结果令人满意。

第二阶段为全面研制和试验阶段:从1979年到1984年,又陆续发射了7颗试验卫星。这一阶段的卫星称为Block I卫星。与此同时,研制了各种用途的接收机,主要是导航型接收机,同时测地型接收机也相继问世。试验表明,GPS的定位精度远远超过设计标准。利用粗码的定位精度几乎提高了一个数量级,达到14m。由此证明,GPS计划是成功的。

第三阶段为实用组网阶段:1989年2月4日第一颗GPS工作卫星发射成功,宣告了GPS系统进入工程建设阶段。这种工作卫星称为Block II和Block II A卫星。这两组卫星的差别是:Block II A卫星增强了军事应用功能,扩大了数据存储容量;Block II卫星只能存储供14天用的导航电文(每天更新三次);而Block II A卫星能存储供180天用的导航电文,确保在特殊情况下使用GPS卫星。实用的GPS星座包括21颗工作卫星和3颗备用卫星,今后将根据情况需要,适时更换失效的卫星。

实践证明:GPS对人类活动影响极大,应用价值极高,因此得到美国政府和军队的高度重视,甚至不惜投资300亿美元来建立这一工程,成为继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的第三项庞大空间计划。该工程从根本上解决了人类在地球上的导航和定位问题,可以满足各种不同用户的需要。对舰船而言,它能在海上协同作战、海上交通管制、海洋测量、石油勘探、海洋捕鱼、浮标建立、管道和电缆铺设、海岛暗礁定位、海轮进出港引航等方面作出贡献。对飞机而言,它可以对飞机进场着陆、航线导航、空中加油、武器准确投掷及空中交通管制等方面进行服务。在陆地上,可用于各种车辆、坦克、陆军部队、炮兵、空降兵和步兵等的定位。在空间技术的应用方面,可以用于弹道导弹的引导和定位、空间飞行器的精密定轨等。总之,GPS系统的建立,给导航和定位技术带来了巨大的

变革。

全球定位系统(GPS)利用卫星发射无线电信号进行导航定位,具有全球、全天候、高精度、快速实时的三维导航、定位、测速和授时功能。目前,已广泛应用于大地测量、工程测量、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多学科领域,从而给测绘学科带来了一场深刻的技术变革。

1.2.1 系统组成

GPS 定位系统主要由空间部分(GPS 卫星星座)、地面控制部分(监控跟踪系统)、用户接收机等三部分组成。

1. 空间部分

GPS 的空间部分由 24 颗 GPS 工作卫星和 3 颗备用卫星所组成,这些工作卫星共同组成了 GPS 卫星星座,如图 1.4 所示。这 24 颗卫星分布在 6 个倾角为 55° 的轨道上绕地球运行,卫星的运行周期约为 12 恒星时。每颗 GPS 工作卫星都发射用于导航定位的信号,GPS 用户正是利用这些信号来进行工作。

2. 地面控制部分

地面监控部分由监测站、主控站和注入站组成。监测站的作用是跟踪 GPS 卫星,提供原始观测数据。每个监测站上都有 GPS 接收机对所见卫星进行观测,采集环境要素等数据,经初步处理后上传到主控站。主控站收集各个监测站的 GPS 观测信息,对卫星进行轨道确定,并生成每颗卫星的星历(包括时钟改正量、状态数据以及信号的大气层传播改正),再按一定的格式编制成导航电文,上传到注入站。此外主控站还控制和监视其余站的工作情况并管理调度 GPS 卫星。注入站用于地面与卫星进行数据通信,它使用 S 波段的通信链路将主控站上传的导航电文注入相应的 GPS 卫星中,再通过 GPS 卫星将导航电文广播给地面上的广大用户。当前,GPS 地面监控部分包括 2 个主控站,16 个监测站和 12 个注入站,均由美国军方所控制,如图 1.5 所示。

3. 用户部分

GPS 的用户部分由 GPS 接收机、数据处理软件及相应的用户设备,如图 1.6 所示。它的作用是接收 GPS 卫星所发出的信号,利用这些信号进行导航定位工作。

以上这三个部分共同组成了一个完整的 GPS 系统。

1.2.2 系统特点

GPS 导航定位以其高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等特点著称。

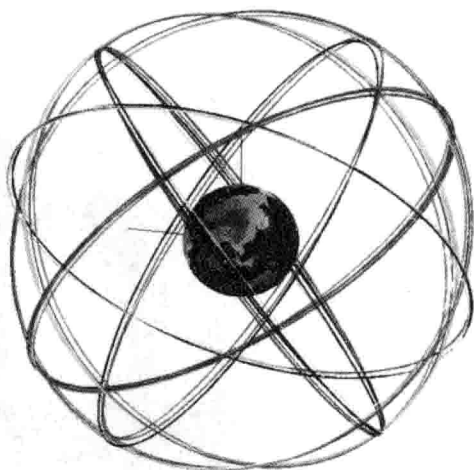


图 1.4 GPS 卫星星座