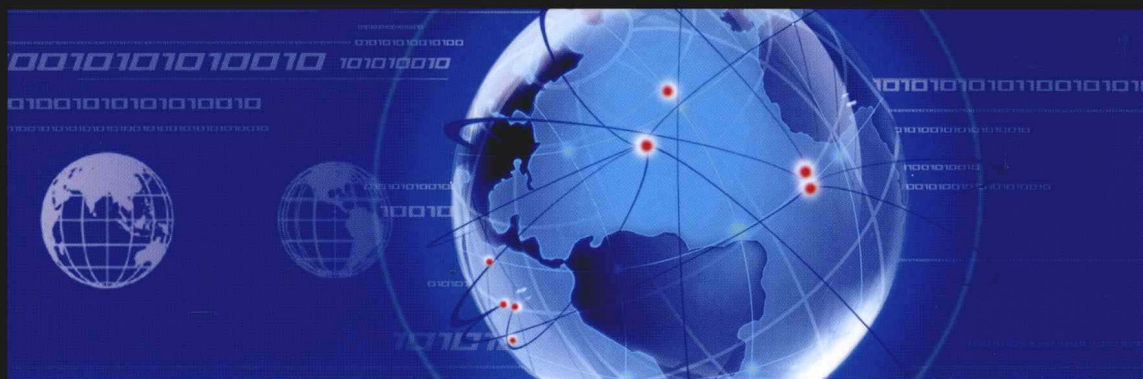


田孝华 周义建 著



无线电定位 理论与技术

THEORY
AND TECHNOLOGY
OF WIRELESS
LOCATION



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线电定位理论与技术

田孝华 周义建 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地阐述了无线电定位理论与定位参数的测量与估计技术,既有基本理论与实用技术,又有最新的研究成果。本书由四部分组成,第一部分包括第1章~3章,讨论了无线电定位的基本知识与基本理论;第二部分包括第4章~6章,对定位参数的测量与估计技术进行了详细分析;第三部分包括第7章~8章,对蜂窝网移动台定位的非视距影响减轻技术与参数高分辨估计技术进行了深入研究;第四部分由第9章组成,介绍了利用蜂窝网基站与广播电台信号对三维运动目标进行检测、定位与跟踪的方法。

本书既可作为本科生高年级和研究生的教材与参考书,也可供从事无线电导航与定位的工程技术人员、科研工作者以及大专院校教师学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线电定位理论与技术 / 田孝华,周义建著. —北京:国防工业出版社,2011.1

ISBN 978-7-118-07231-0

I. ①无... II. ①田... ②周... III. ①无线电定位 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 237562 号

※

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 字数 363 千字

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

精确打击是现代信息化战争的一个突出特点,而位置信息与精确打击密切相关。定位通常是指确定目标在某一参考坐标系中的位置。无线电定位则是利用无线电信号的电参量获取定位参量,并采用适当的定位算法计算出目标的位置。由于无线电定位利用的是无线电波,受气候条件影响较小,因此,它既是保障人类交通安全和从事军事活动的必要手段,也是在复杂气候条件下一种很有效的导航方法。无线电定位在现代社会中,特别是在信息化战争中发挥着越来越大的作用,其运用覆盖军用与民用的各个领域,不仅包括航空/航海的安全航行与交通管制、空间飞行器的定位、测控与精确制导、车辆的运输调度与导航、大地测量、地震预报、森林防火、地质勘探和国土开发,而且近年来在蜂窝系统设计、信道分配与切换、小区服务区域确定、E-911 紧急搜索救援等方面也有广泛应用。

为适应信息化战争与民用的需要,作者以在研究生教学中使用过多届的《定位原理与计算方法》讲义为基础,结合最新研究成果,并查阅大量文献资料,扩充完善内容,著述了本书。本书系统地阐述了无线电定位理论与定位参数估计技术,既有无线电定位的基本理论与实用技术,又有无线电定位的前沿知识,并包含作者大量的研究成果。

各章内容概括如下:

第 1 章简要介绍了现有的各种无线电定位系统,评述了无线电定位算法与定位参数测量与估计技术的进展与现状,使读者能了解其整体概貌。

第 2 章介绍了无线电定位的基本知识,包括无线电波的传播特性、多普勒效应及其应用、定位中常用的位置线与位置面、常用坐标系及其转换、定位误差等内容,并重点对后两部分内容进行了讨论。

第 3 章从测量方程的建立、位置坐标的解算以及定位误差分析三方面对无线电测距定位、测距差定位、测距和定位、测角定位以及混合定位进行了深入系统地分析。另外,还介绍了两种典型位置坐标解算方法。

第 4 章详细讨论了各种传统而又实用的无线电测角技术,包括振幅式 E 型最小信号法测角、振幅式 M 型最小信号法测角、振幅式 M 型比较信号法测角、干涉式测角、旋转方向性图的相位式测角、旋转无方向天线的相位式测角、收发分离波束往返扫描测角、收发分离波束圆周扫描测角、收发一体波束扫描测角、比幅法和差双波束测角以及比相法和差双波束测角等内容。对每种测角方法不仅讨论了测角原理、技术实现框图,而且围绕框图进行了详细理论分析。

第 5 章讨论了基于阵列天线的角度估计技术。首先在介绍阵列天线接收信号模型的基础上,对基于波束形成的两种波达方向估计方法——延迟—相加法与 Capon 最小方差法进行了讨论,然后重点分析了两种波达方向高分辨估计的子空间方法——MUSIC 算法与 ESPRIT 算法以及最优波达方向估计方法——最大似然算法,并对相干信号的波达方

向估计技术进行了介绍,最后简单介绍了基于高阶累积量的波达方向估计方法。

第6章详细讨论了各种无线电测距与测距差技术。在简单介绍无线电测距与测距差基本方法的基础上,重点对脉冲式测距、频率式测距、码相关测距以及脉冲—相位测距差技术从工作原理、技术实现等方面进行了详细分析,特别是对卫星导航定位中采用的码相关测距技术进行了深入剖析。另外,还简单介绍了无线电测距/测距差中的多径时延估计算法。

第7章研究了蜂窝网无线电定位中的非视距影响减轻技术。首先详细讨论了视距重构定位算法、非视距加权定位算法、基于视距重构与平滑处理相结合的 TOA 定位算法以及基于不等式约束的各种定位算法,然后对每种定位算法进行了大量仿真分析。

第8章研究了蜂窝网无线电定位参数高分辨估计方法。在介绍信号模型的基础上,重点对适用于 CDMA 蜂窝网环境的几种高分辨定位参数估计算法进行了讨论,包括多维 MUSIC 算法、特性恢复与子空间相结合的波达方向综合估计方法、基于用户特征序列的波达方向与多径时延的联合估计方法以及基于空时导向矢量的波达方向与多径时延的联合估计方法,并对算法性能进行了仿真分析。

第9章研究了利用第三方信号对运动目标的检测定位与跟踪技术。首先分析了利用 CDMA 蜂窝网资源对运动目标检测定位与跟踪的可行性与存在的难点问题,然后讨论了一种干扰对消与定位参数估计方法以及对运动目标进行定位的 TDOA 定位算法与跟踪算法,并仿真分析了算法的性能,最后简要介绍了基于广播台信号对运动目标定位的关键技术。

本书作者从事无线电导航与定位的教学与科研工作二十余年,并且博士学位论文也是蜂窝网无线电定位与参数估计技术的研究,有着扎实的专业理论与丰富的科研经历。本书图文并茂,语言平实、简练,内容丰富,重点突出,理论推导严密,成果应用可信。它不仅适合作为本科生高年级和研究生的教材与参考用书,而且可供从事无线电导航与定位的工程技术人员、科研工作者以及大专院校教师参考。

在本书的编写过程中,得到了空军工程大学电讯工程学院训练部、导航工程系领导的关心与支持,导航工程系博士生导师赵修斌教授、金伟副教授、徐小杰博士以及博士研究生庞春蕾、邵能健、戴传金认真审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于作者知识水平有限,对书中存在的错误与不足恳请广大读者批评指正。

作者

2010年10月

于空军工程大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线电定位系统概述	1
1.1.1 陆基无线电导航定位系统	1
1.1.2 星基无线电定位系统	3
1.1.3 蜂窝网无线电定位系统	5
1.2 无线电定位算法与参数估计技术的发展现状	7
1.2.1 无线电定位算法	7
1.2.2 定位参量测量与估计技术	8
参考文献	11
第 2 章 无线电定位理论基础	15
2.1 无线电信号传播特性	15
2.1.1 无线电频段的划分	16
2.1.2 无线电信号的传播特性	16
2.1.3 采用无线电信号定位的依据	21
2.2 多普勒效应及其应用	21
2.2.1 发射源运动,接收端固定时的多普勒效应	21
2.2.2 发射源不动,接收端相对发射源运动时的多普勒效应	23
2.2.3 收发均在同一个载体上相对反射目标运动时的多普勒效应	24
2.2.4 多普勒效应在定位中的应用	25
2.3 无线电定位常用坐标系及其转换	25
2.3.1 定位坐标系	26
2.3.2 坐标系转换	29
2.3.3 测量参量的站间坐标转换	31
2.4 无线电定位常用位置线与位置面	35
2.4.1 位置线与位置面的基本概念	35
2.4.2 常用的位置线与位置面	35
2.5 定位误差	39
2.5.1 定位误差的表示方法	39
2.5.2 定位参量误差与位置线误差之间的关系	41

2.5.3 定位误差与位置线误差的关系	44
参考文献	45
第3章 无线电定位原理	46
3.1 两种典型的位置坐标解算方法	46
3.1.1 泰勒级数定位方法	46
3.1.2 Chan 定位方法	47
3.2 测距定位原理	50
3.2.1 两站测距平面定位	50
3.2.2 多站测距平面定位	53
3.2.3 测距空间定位	56
3.3 测距差定位原理	60
3.3.1 三站测距差平面定位	60
3.3.2 多站测距差空间定位	62
3.4 测距和定位原理	65
3.5 测角定位原理	67
3.6 混合定位原理	69
3.6.1 单站测角/测距平面定位	69
3.6.2 单站测角/测距空间定位	71
3.6.3 两站测角/测距/测距和空间定位	71
3.6.4 两站测角/测距和空间定位	73
3.6.5 多站测距/测距和空间定位	75
参考文献	77
第4章 传统无线电测角技术	79
4.1 引言	79
4.2 振幅式测角	80
4.2.1 振幅式 E 型最小信号法测角	80
4.2.2 振幅式 M 型最小信号法测角	82
4.2.3 振幅式 M 型比较信号法测角	86
4.3 相位式测角	90
4.3.1 干涉式测角	90
4.3.2 旋转方向性图的相位式测角	91
4.3.3 旋转无方向天线的相位式测角	100
4.4 时基波束扫描测角	104
4.4.1 收发分离波束往返扫描测角	105
4.4.2 收发分离波束圆周扫描测角	106
4.4.3 收发一体波束扫描测角	108

4.5	双波束测角技术	109
4.5.1	比幅法和差双波束测角	109
4.5.2	比相法和差双波束测角	111
	参考文献	112
第5章	基于阵列天线的角度估计技术	113
5.1	阵列天线接收信号模型	113
5.1.1	阵列几何结构	113
5.1.2	参数化数据模型	114
5.2	基于波束形成的波达方向估计方法	116
5.2.1	延迟—相加法	116
5.2.2	Capon 最小方差法	117
5.3	波达方向高分辨估计的子空间方法	118
5.3.1	阵列接收信号模型的进一步讨论	118
5.3.2	MUSIC 算法及其改进	122
5.3.3	ESPRIT 算法	126
5.4	DOA 估计的最大似然算法	128
5.5	相干信号的波达方向估计技术	130
5.5.1	相干源问题	131
5.5.2	空间平滑技术对相干源的高分辨处理	132
5.5.3	空间平滑去相关性能分析	134
5.6	基于累积量的波达方向估计方法	135
5.6.1	累积量的定义和性质	135
5.6.2	基于高阶累积量的 DOA 估计	136
	参考文献	138
第6章	无线电测距与测距差技术	140
6.1	无线电测距与测距差基本方法	140
6.2	脉冲式测距	142
6.2.1	测距过程与关键技术	142
6.2.2	测距技术实现	146
6.3	频率式测距	153
6.3.1	直接调频测距	153
6.3.2	常数差频调频测距	157
6.4	码相关测距	160
6.4.1	码相关测距工作原理	160
6.4.2	码相关测距技术实现分析	162
6.5	距离差测量方法	179
6.5.1	脉冲—相位测距差工作原理	179

6.5.2	脉冲—相位测距差信号格式	180
6.5.3	脉冲—相位测距差技术实现	181
6.6	无线电测距/测距差多径时延估计算法	183
6.6.1	互相关时延估计法	184
6.6.2	广义互相关时延估计法	185
6.6.3	二次相关时延估计法	186
6.6.4	最小均方自适应时延估计法	186
6.6.5	基于IFFT频谱相除技术的时延估计算法	187
6.6.6	WVD时延估计法	188
6.6.7	MUSIC高分辨时延估计算法	189
	参考文献	191
第7章	蜂窝网无线电定位非视距减轻技术	194
7.1	视距重构定位算法	194
7.1.1	非视距传播误差鉴别	194
7.1.2	非视距传播误差的抑制	195
7.2	非视距加权定位算法	195
7.3	基于视距重构与平滑处理相结合的TOA定位算法	197
7.3.1	时间测量模型	197
7.3.2	非视距传播时延的均值与方差	197
7.3.3	Chan方法的推广	199
7.3.4	减小NLOS传播影响的TOA定位算法	200
7.3.5	性能仿真分析	201
7.4	基于不等式约束的定位算法	203
7.4.1	基于不等式约束的TOA定位算法	203
7.4.2	基于不等式约束的AOA定位算法	204
7.4.3	基于不等式约束的TOA/AOA定位算法	208
7.4.4	不等式约束技术在联合定位中的应用	211
	参考文献	213
第8章	蜂窝网无线电定位参数高分辨估计技术	215
8.1	引言	215
8.2	信号模型	216
8.3	多维MUSIC算法	217
8.4	特性恢复与子空间相结合的DOA估计方法	217
8.4.1	基于迭代最小二乘投影的恒模算法(TLSP-CMA)	218
8.4.2	DOA估计的综合法	219
8.5	基于用户特征序列的波达方向与多径时延的联合估计	220
8.5.1	期望用户多径识别与时延估计	220

8.5.2	波束形成权的估计	221
8.5.3	波达方向的估计	222
8.5.4	性能仿真分析	222
8.6	基于空时导向矢量联合估计信号的波达方向与多径时延	224
8.6.1	信号模型的进一步讨论	224
8.6.2	波达方向与多径时延的联合估计算法	225
8.6.3	性能仿真分析	226
	参考文献	227
第9章	基于第三方信号的运动目标定位技术	230
9.1	引言	230
9.2	利用 CDMA 蜂窝网对运动目标检测定位与跟踪	230
9.2.1	利用基站信号对运动目标检测定位的可行性与难点	230
9.2.2	干扰对消与定位参数估计	232
9.2.3	利用 TDOA 对运动目标的定位算法	234
9.2.4	运动目标跟踪算法	236
9.2.5	利用单基站对三维运动目标的定位	237
9.2.6	仿真分析	237
9.3	基于广播台信号对运动目标定位的关键技术	239
9.3.1	信号处理方案	239
9.3.2	直达波及近程杂波抑制方法及性能	239
9.3.3	通道一致性对相消性能的影响	241
9.3.4	实测数据分析及处理	243
	参考文献	244

第 1 章 绪 论

定位是指确定目标在某一参考坐标系中的位置。目前,常采用的定位方法有 3 种,即推算定位(Dead Reckoning, DR)、接近式定位(Proximity)和无线电定位(Radio Location),其中推算定位是基于一个相对参考点或起始点,借助地图匹配等技术确定移动目标位置,适用于对运动目标的连续定位。接近式定位又称信标(Signpost 或 Beacon)定位,它是通过最近的固定参考检测点来确定运动目标的位置。无线电定位是利用接收的无线电信号的电参量获取定位参量,并采用适当的定位算法计算出目标的位置。由于无线电定位利用的是无线电波,受气候条件影响较小。因此,它既是保障人类交通安全和从事军事活动的必要手段,也是在复杂气候及能见度不良情况下一种有效的导航方法,可在近、中、远距离完成定位任务。尽管无线电定位最早运用于导航,但在现代社会中发挥着越来越大的作用,运用遍及各个领域,如大地测量、地震预报、车辆的运输调度、森林防火、地质勘探和国土开发、航空/航海安全航行和交通管制、空间飞行器的定位和测控与精确制导以及授时、移动通信、搜索救援等。无线电定位可分为星基无线电定位和陆基无线电定位。星基无线电定位是利用 GPS、GLONASS、“伽利略”、“北斗”双星、“北斗”二代等卫星系统的多个卫星发射的信号实现目标的三维定位。陆基无线电定位则是利用安装在地面的无线电信标或接收设备,通过测量无线电信号的传播时间、时间差、信号场强、相位或入射角等参数来实现目标的定位。陆基无线电定位根据用途不同又可分为陆基无线电导航定位和蜂窝网无线电定位。本章首先对现有的各类无线电定位系统进行介绍,然后对无线电定位算法与定位参数的测量与估计技术的发展现状进行综述。

1.1 无线电定位系统概述

1.1.1 陆基无线电导航定位系统

20 世纪以来,针对快速移动目标(如飞机、舰船、车辆)的定位与导航,研制了各种陆基无线电导航系统,如 Loran - C (“罗兰” - C)、OMEGA (“奥米加”)、TACAN (“塔康”)、VOR/DME、AVL(自动车辆定位)系统、仪表着陆系统、微波着陆系统、着陆雷达、无线电信标等。其中能够为飞机、舰艇提供位置信息的陆基无线电导航定位系统有“罗兰” - C、“奥米加”、“塔康”以及着陆雷达。为车辆提供位置信息的系统有自动车辆定位系统,该系统曾在公共交通管理、货物运输以及出租车管理中得到广泛应用。这些系统都采用线交叉定位方法实现定位,其差别主要在于基于不同用途而采用不同的无线电频段和系统结构。

1. “罗兰” - C 导航系统

“罗兰” - C 导航系统是美国在第二次世界大战末期研制开发的远程导航系统,在

卫星导航系统使用之前得到了大量发展与应用,我国的“长河”2号系统与“罗兰”-C系统工作原理相同。该系统主要由地面设备和用户设备两部分组成,地面设备一般由3个地面导航台组成,其中一个为主台,其余为副台。该系统的工作频率为100kHz,采用的是双曲线定位原理,距离差定位参量通过测量主副台两个脉冲包络间的时间差以及载波相位共同完成。该系统的导航工作区域约为2000km,其定位精度一般为200m~300m,且与航行器相对于导航台的距离有关,距离越远,其定位误差越大。由于电波沿直线传播而且要穿透电离层,考虑到地球表面的弯曲和地形起伏,一个导航台只能覆盖很小的区域。要完成大范围覆盖则要毗邻布局大量导航台,而且在海上和边远地区由于无法或很难建台,信号很难实现全区域覆盖。该系统的服务对象主要是海上舰船,不适合高动态飞行器(如战斗机),也不适合在城市使用,因为来自交流电源设备的过量干扰会产生低频干扰。

2. “奥米加”导航系统

“奥米加”导航系统是一个曾在早期得到使用的远程导航系统,工作频率为十几千赫,采用的是双曲线定位原理。该系统由于工作的波长较长,电磁波通过大气波导传播,所以它的导航工作区域比“罗兰”-C要大得多,建立8个地面导航台就可以提供全球覆盖。然而由于工作在低频,电波传播受到电离层变动、地表导电性能变动的影 响,因此导航精度较低,约为几千米。另外,工作频率低,也需要庞大的发射天线和地网。

3. “塔康”系统

“塔康”是战术空中导航(Tactical Air Navigation)英文缩写TACAN的音译名称。“塔康”系统是美国在20世纪50年代初研制成功的军用战术飞机专用的近程无线电导航定位系统。由于其有效作用距离在近程范围内且只能用于航空导航,故又称为航空近程导航系统。“塔康”系统在我军应用较多,下一步建设目标是由单台定位发展到“塔康”组网。该系统具有测距测位功能,采用极坐标定位原理,其工作频率范围为962MHz~1213MHz,作用距离约为500km。定位精度与航行器相对于导航台的距离有关,且距离增加,定位精度下降。

4. 着陆雷达

着陆雷达与一般警戒雷达的工作原理类似,都是以无线电波的反射现象为基础来进行测距与测角,以确定目标位置。着陆雷达与一般警戒雷达的不同点是:探测范围小,定位精度高,天线扫描快,能同时测出目标的方位、仰角和距离。着陆雷达在我军有着广泛应用,工作频率为9370MHz,作用距离为35km左右,发射脉冲功率大于50kW。在引导下滑过程中,利用航向天线和下滑天线轮流向空中辐射一个很窄的波束,这两个波束对准跑道着陆方向快速进行扫描探测。其中航向天线辐射的无线电波束以跑道中心延长线为基准,在水平面上进行左右扫描,形成一个连续的水平扫描波束。下滑天线辐射的无线电波束以地平线为基准,在垂直面上进行上下扫描,形成一个连续的垂直扫描波束。当航向天线扫描波束扫描到飞机时,接收到的反射回波信号便在航向显示器的画面上显示一个目标回波;当下滑天线扫描波束扫到飞机时,接收到的反射回波信号便在下滑显示器的画面上显示一个目标回波。如果两天线波束都能扫到飞机时,则下滑和航向两个显示画面上可以连续显示着陆飞机的回波,根据着陆飞机的航迹,判断和测定着陆飞机偏离正常下滑道的情况,并通过无线电通信电台,向下滑着陆的飞机通报至着陆点的距离以及航向和高

度的偏差情况,或者下达修正口令,指挥引导飞机安全着陆。

1.1.2 星基无线电定位系统

随着第一颗人造地球卫星的发射成功,以卫星为基地的卫星导航定位系统,由于既具有天体导航覆盖全球的优点,又具有陆基无线电导航定位系统的全天候和高精度的长处,从开始到现在一直得到空前的重视。相继出现的卫星导航定位系统有“子午仪”卫星导航系统(Transit)、全球定位系统(GPS)、GLONASS 系统以及“北斗”双星定位系统,正在实施的有“伽利略”(Galileo)卫星导航定位系统以及我国的“北斗”二代卫星导航定位系统。下面对每个系统进行简单介绍。

1. “子午仪”卫星导航系统

“子午仪”卫星导航系统,即美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。由于该系统的卫星轨道通过地极,所以又称为“子午仪”卫星导航系统。与尔后研制的卫星导航定位系统不同,它是利用卫星运行引起的多普勒频移的方法进行定位,而不是采用测距的方法实现定位。1964年1月,该系统用于“北极星”核潜艇的导航定位获得成功,并逐步用于各种军舰的导航定位。1967年7月,经美国政府批准,对其广播星历解密,并提供民用,在远洋船舶导航和海上定位服务等方面得到了广泛的应用。

尽管作为第一个卫星导航定位系统的“子午仪”卫星导航系统曾得到广泛应用,并且与陆基导航定位系统相比,也显示出了巨大的优越性,但是该系统在实际应用方面还是存在着严重的缺陷。该系统是由5个~6个卫星组成的导航网,卫星运行高度低(平均约为1000km),运行周期为107min,对同一个卫星每天通过次数最多为13次,从地面站观测到卫星的时间间隔平均约为1.5h。由于采用多普勒定位原理,一台接收机一般需要观测15次合格卫星信号,才能达到 $\pm 10\text{m}$ 的单点定位精度。在全球范围内,它给出的定位信息只能是全天候的连续二维坐标(经度和纬度),不能给出高程。这种系统,一方面由于所需的观测时间较长,不能给用户,尤其是高动态用户(如飞机、车辆等)提供实时定位和导航服务;另一方面,由于卫星轨道较低,受大气影响严重,定位精度的提高受到限制,因而限制了高动态用户和高精度用户的使用。对舰船而言,利用这一系统只能对惯性导航系统和其他无线电导航系统进行连续的精确修正,它的作用远不能满足全球实时定位的要求。

2. GPS

GPS是英文Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System的字头缩写词NAVSTAR/GPS的简称,它的含义是,利用卫星的测时和测距进行导航,以构成全球卫星定位系统。GPS是目前技术上最成熟且已广泛应用的一种卫星导航定位系统,能够便捷地提供高精度的连续位置、速度、航向、姿态和时间信息。它的主要特点是:能提供全球及全天候导航定位,定位精度高,定位速度快,保密性强。

GPS卫星由24颗组成,它们分布在互成 60° 的6个轨道面上,轨道倾角为 55° ,其中21颗为工作卫星,3颗为在轨备用卫星。对于地球任何位置,均能同时观测到6颗~9颗卫星。设计C/A码的定位精度为100m左右,P码定位精度为10m左右。由于GPS采用的是测距定位体制,因此要求GPS卫星必须具有高度精确的时钟(频标)。

世界上许多公司都在进行高精度GPS用户设备的研制,并出现了许多高性能的产品。如美国的高通公司和加拿大的NovAtel公司研制的高动态、高数据输出率GPS接收

机的单机定位精度可达 10m,差分精度最高可达 1cm 左右,若进行数据后处理,其精度可达 5mm。GPS 用户设备发展的主要趋势为:高集成度、小型化;高动态、多通道;差分 GPS 接收机;以 GPS 为中心的组导航系统以及高精度动态接收机,此外,GPS 与移动通信设备的结合已成为重要趋势。

3. GLONASS

GLONASS 是由苏联开始研制,后由俄罗斯继续完善的全球卫星导航系统。1995 年 12 月 14 日,俄罗斯成功地发射了一箭三星卫星,标志着 GLONASS 星座的在轨卫星已经布满,经过数据加载、调整和检验,1996 年 1 月 18 日,24 颗工作卫星正常发射信号,健康有效地正式工作。

GLONASS 比 GPS 起步晚 9 年,全星座正常运行比 GPS 晚近 3 年时间。从苏联 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星以来,历经 13 年,总共发射了 73 颗卫星。GLONASS 星座的轨道为 3 个等间隔近圆轨道,每个轨道面上均匀分布 8 颗卫星。3 个轨道面升交点经度之差为 120° ,按地球自转方向将其编号为 1、2、3。同一轨道面编号按卫星运动方向的反方向递增,第 1 轨道面上的卫星为 1~8,第 2 个轨道面上为 9~16,第 3 轨道面上为 17~24。同一轨道面上相邻卫星纬度幅角相差 45° ,相邻轨道面上二相邻卫星纬度幅角相差 15° 。GLONASS 和 GPS 两大系统基本工作原理极其相似。

由于可靠性和定位精度等原因,近年来 GPS + GLONASS 双系统导航定位系统得到了快速发展。一般而言,GPS 和 GLONASS 两个卫星导航系统同时被美国和俄罗斯关闭的可能性很小,因而双系统接收机在军事和民用上都有重要应用价值。

双系统卫星导航定位有如下明显优势。第一,可见卫星数增加一倍。在地平线以上的可见卫星数对 GPS 一般为 7 颗~11 颗,对 GPS + GLONASS 则可达到 14 颗~20 颗。在山区或城市中,有时因障碍物遮挡,GPS 可能无法工作,GPS + GLONASS 则可以工作。第二,提高定位效率。在测量应用中,GPS 测量所需要的观测时间取决于求解载波相位整周模糊度所需的时间。观测时间越长或可观测到的卫星数越多,用于求解载波相位整周模糊度的数据也就越多,求解结果的可靠性越好。为了提高定位效率,常使用快速定位、实时动态测量(RTK)或后处理动态测量等方法,但要满足一定的精度要求,必须正确求解载波相位整周模糊度。可观测到的卫星数增加得越多,求解载波相位整周模糊度所需的观测时间就可缩短得越多,因此 GPS + GLONASS 可以提高定位效率。第三,提高观测结果的可靠性。用卫星系统进行测量定位的观测结果的可靠性主要取决于用于定位计算的卫星颗数,因此 GPS + GLONASS 将大大提高观测结果的可靠性。第四,提高观测结果的精度。观测卫星相对于测站的几何分布直接影响观测结果的精度。可观测到的卫星多,就可以大大改善观测卫星相对于测站的几何分布,从而提高观测结果的精度。

4. 双星定位系统

由于卫星定位技术在国防和国民经济中的作用越来越大,为了保证国防和国民经济的安全,我国也在“九五”列项提出双星定位导航系统,其工程代号取名为“北斗”1 号,该系统为我国自主研制开发的第一代卫星导航定位通信系统。我国的双星定位系统用两颗地球同步卫星进行双向测距外加数字高程地图定位,可双向数据报文通信,系统自含差分定位功能,卫星至中心站链路使用标准 C 频段,其服务范围包括我国大

陆和东南海域,属于区域性导航系统。“北斗”一代卫星导航系统有快速定位、简短通信以及精密授时三大功能。

北斗卫星导航系统是由两颗地球同步卫星、地面中心站、用户终端三部分组成的。定位可以由用户终端向中心站发出请求,中心站对其进行定位后将位置信息广播出去由该用户获取,也可以由中心站主动进行指定用户的定位,定位后不将位置信息发送给用户,而由中心站保存。在双星定位系统中,结合数字地面高程,可得知目标位置的大地高程,且已知目标在赤道平面北侧。由于是地球同步卫星,两颗卫星和中心站的地心坐标都是已知的。定位采用三球相交的方法,具体的定位过程是:首先由中心站发出信号,分别经两颗卫星反射传至接收部分,再由接收部分经两颗卫星反射分别传回中心站,中心站计算出两种途径所需时间,再经过计算即可确定接收机的二维位置,定位精度为 15m 左右。

由于双星定位系统采用的是有源定位方式,并且能满足的用户数量有限,我国正在发展“北斗”2号卫星定位系统。

5. “伽利略”卫星导航定位系统

2002年初,欧盟(EU)首脑会议批准实施“伽利略”(Galileo)卫星导航系统计划,并要求2002年3月26日召开的欧盟15国交通部长会议为之采取“一切必要措施”以及提供财政支持。几经波折之后,欧洲自己研制的卫星导航系统终于启动。按照“伽利略”计划,欧洲计划预算投入为34亿欧元,关键设备均由欧洲人自己设计制造,卫星导航系统由民用部门控制。这是继已有的EGNOS(欧洲静止轨道导航重叠服务)之后,欧洲朝着发展自己的卫星导航技术方向迈出的重要一步。实施“伽利略”计划将使欧洲拥有自己独立的卫星定位和导航系统,并赢得建立欧洲共同安全防务体系的条件。

“伽利略”卫星导航系统设计功能强大,具有GPS所没有的技术优势和服务范围。它的建成将会明显改善全球卫星定位及导航领域的服务质量。计划建设中的“伽利略”卫星定位系统将由30颗轨道卫星组成,卫星的轨道高度为 2.4×10^4 km,倾角为 56° ,分布在3个轨道面上,每个轨道面部署9颗工作星和1颗在轨备份星。“伽利略”将为用户提供误差不超过1m、时间高度精确的定位服务。

“伽利略”与GPS相比,有较大的不同和优越性。例如,“伽利略”系统的卫星数量多、轨道位置高、轨道面少;“伽利略”更多用于民用,可为地面用户提供3种信号:免费使用的信号、加密且需交费使用的信号、加密且需满足更高要求的信号。其精度依次提高,最高精度比GPS高10倍,即使是免费使用的信号精度也达到6m。

1.1.3 蜂窝网无线电定位系统

20世纪80年代以来,随着人们对智能交通运输系统(ITS)的需要以及蜂窝移动通信技术的迅速发展和移动台数目的急剧增加,对无线电定位技术也有了新的要求。美国在1991年开始实施的智能运输系统通信标准中,提出了通过移动通信网提供定位业务的要求。1996年,美国联邦通信委员会(FCC)正式将位置信息的提供列为911急救业务的必备要求,并要求“在2001年10月前各种无线蜂窝网必须能对发出E-911紧急呼叫的移动台提供定位服务,且精度在125m以内的概率不低于67%,在2001年以后提供更高的定位精度与三维位置信息”。该委员会于1998年和1999年两次对标准进行了修改与补

充。在 1998 年提出了“定位精度在 400m 以内的概率不低于 90% 的服务要求”。在 1999 年 12 月美国联邦通信委员会在 FCC99-245 中将 E-911 的需求做了进一步的修改和细化,它不仅对网络设备和手机生产商、网络运营商等对定位技术在网络设备和手机中的实施和支持提出了明确要求和目标安排,而且根据定位的类型不同,对定位精度做出了更为明确的规定。即“基于蜂窝网络的定位(不改动终端),要求定位精度在 100m 以内的概率不低于 67%,在 300m 以内的概率不低于 95%;基于移动台的定位(可以改动终端),要求定位精度在 50m 以内的概率不低于 67%,在 150m 以内的概率不低于 95%”。虽然对蜂窝网中移动台定位的要求最初是由 FCC 为满足 E-911 要求而提出的,但对网络中的移动台进行定位还具有以下优点:系统可以利用移动台的位置信息来增加系统性能、改进系统设计、有效管理网络资源、调节系统容量、实行灵活收费、提供信息服务以及为快速破获利用移动电话进行的经济欺诈提供可能。自 E-911 要求颁布以来,由于政府的强制性要求和市场利益的驱动,定位服务成为了第三代移动通信系统必须具备的一个基本功能,促使国际上出现了对移动定位的研究热潮。

随着研究的深入,在网络中准确确定移动台位置的重要性和必要性逐渐体现出来,网络中各种基于移动台位置的定位服务(LCS),如公共安全服务、紧急报警服务、基于移动台位置的计费、车辆和交通管理、导航、城市观光、网络规划与设计、网络 QoS 和无线资源管理的改进等,无不与准确定位移动台的位置有关。在蜂窝网络中需要定位的移动台通常是静止或慢速移动的用户终端,因此,定位通常利用蜂窝网络采用无线电定位技术,根据需要也可以利用卫星参与辅助定位。

根据进行定位的主体和利用的设备不同可将移动台的无线定位分为基于移动台(终端)的定位、基于网络的定位及 GPS 辅助定位 3 种类型。基于移动台的定位是由移动台根据接收到的多个位置已知的基站信号的电参量,确定出移动台与基站间几何关系,并由集成在移动台中的定位算法,估计出移动台的位置。采用这种定位方案的优点是不需要增加网络负荷,缺点是必须对终端进行改动;基于网络的定位是由多个位置已知的基站同时检测移动台发射的信号,并将各接收信号携带的某种与移动台位置有关的特征信息送到网络的移动定位中心(MLC)进行处理,估计出移动台的位置。采用这种方法的优点是终端不需要改动,其缺点是对于 CDMA 蜂窝系统来说是一个功率受限系统,当移动台发射信号不能被多个基站收到时,定位将无法实现。另外,由于对网内所有用户的定位均集中在移动定位中心,对定位算法的高效性、实时性均有很高要求;GPS 辅助定位是由集成在移动台中的 GPS 接收机和网络中的 GPS 辅助设备,利用 GPS 系统实现对移动台的自定位。这种定位方案将网络信息与 GPS 信息相结合,改善了定位的可用性、灵敏性、精确性,但在移动台内部集成 GPS 接收机存在体积偏大、能耗过大、GPS 接收机首次定位时间过长、成本较高等问题。这些定位方式均是通过测量定位参数来完成的,在对移动台的定位中还存在一种不需要测量定位参数的定位技术。这种定位技术被称为起源蜂窝小区(COO)定位技术,它是通过采集移动台所处小区的识别号来确定用户的位置。其优点是定位时间短,缺点是定位精度与小区半径成反比。

经过近几年的快速发展,有些蜂窝网络已具备了定位功能,但由于采用蜂窝网对移动台进行定位时,收发设备间一般为非视距传播,因此定位精度还不能达到 E-911 定位精度的要求。

1.2 无线电定位算法与参数估计技术的发展现状

无线电定位通常需要两步:第一步,根据不同的定位类型,估计相应的定位参数;第二步,根据估计出的定位参数,采用相应定位算法估计目标的位置。下面分别从定位算法与定位参数估计技术两方面综述无线定位的发展过程与现状。

1.2.1 无线电定位算法

无线电定位根据采用的定位参量(或位置线)不同可分为测距定位(圆位置线定位)、测距差定位(双曲线位置线定位)、测距和定位(椭圆位置线定位)、测角定位(直线位置线定位)和混合定位(混合位置线定位)几种类型。根据对定位参数的处理方法不同,无线电定位算法可分为基于几何结构的位置线交叉定位方法和统计定位方法;根据应用场合不同,它可分为视距定位算法和非视距定位算法。由于无线定位技术最初是在无线导航领域获得应用,而对于无线导航系统来说收发设备间一般存在视距传播,因此,早期定位算法均为视距定位算法。随着 E-911 定位要求的提出,在采用蜂窝网对移动台进行定位时,收发设备间一般为非视距传播,因此,后期对定位算法的研究主要集中在减小非视距传播的影响上。基于几何结构的位置线交叉定位方法是一种根据位置线与定位参数的关系,通过计算位置线交点来得到目标位置的方法。由于这种方法需要计算所有独立位置线的交点,当估计出的定位参数与定位的位置坐标数相等或相差不多时,可采用这种方法;当估计出的定位参数远大于定位的位置坐标数时,计算量太大,该方法不适用。另外,采用这种方法可能还会存在由于定位参数的估计误差而导致几条位置线没有交点而无法得到目标位置的问题。位置线交叉定位方法主要运用在导航定位中。统计定位方法是一种利用估计参数误差的统计特性来实现目标定位的方法。在视距传播条件下,定位参数的估计误差一般可用零均值的高斯分布来表示。由于定位参数与位置坐标呈非线性关系,因此,统计定位问题实质上是一个求解非线性最优化问题,而直接求解非线性最优化问题非常复杂,人们开始寻找一种简单方法来求解非线性最优化问题,并获得了丰硕的成果。对视距统计定位方法的研究可归纳为两类:一类是通过适当近似将非线性优化问题转化为线性优化问题。这样,既降低了运算的复杂性,又不会对定位精度有太多损失,是一种求解非线性优化问题的次最优方法。典型方法为 Foy 提出的泰勒级数定位方法。该方法是一种基于泰勒级数展开的加权最小二乘(WLS)估计的迭代算法,利用估计的所有定位参数来改善定位精度,是一种对各种定位类型均适用的方法;另一类是在不进行任何近似的条件下,利用其他信息或多余的定位参数,将非线性方程转化为线性方程,从而用线性最小二乘(LS)估计目标位置。其中最具有代表性的方法是 Chan 方法和 Caffery 方法。前者是针对波达时间差(TDOA)定位系统而提出的一种定位方法。当估计的定位参数与未知变量相等时,它等效为线交叉定位方法;当估计的定位参数大于未知数时,它是一种最大似然(ML)估计的近似实现方法,在参数误差很小时能达到克拉-美劳(C-R)下界。它是通过引入一个中间变量,将非线性方程变为线性方程。后者是针对波达时间(TOA)定位系统而提出的一种定位方法。它在将非线性方程转化为线性方程时,不需要引入中间变量,但要求测量的定位参数最少比未知变量个数多 1 个。