

GPS伪卫星理论、设计与应用

GPS PSEUDOLITES: THEORY, DESIGN, AND APPLICATIONS

H. Stewart Cobb

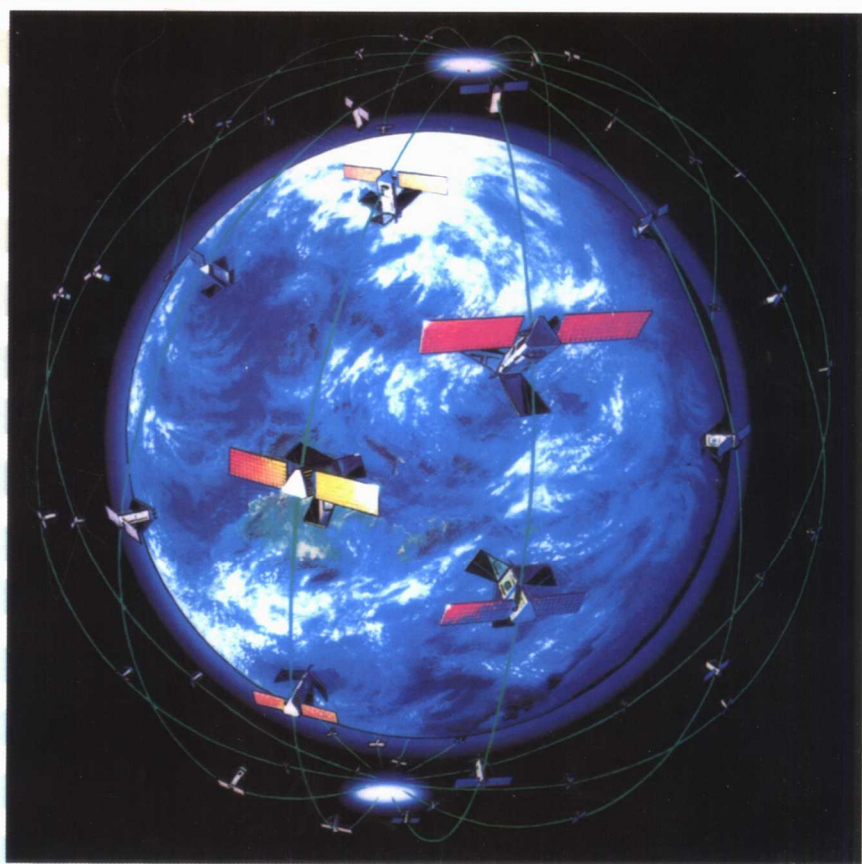
著

耿建平 尚俊娜 张巨勇 吴宅莲

翻译

施游立 蔡贤德

审校



 中国科学技术出版社

GPS 伪卫星理论、设计与应用

GPS PSEUDOLITES: THEORY, DESIGN, AND APPLCATIONS

H. Stewart Cobb

耿建平 尚俊娜 张巨勇 吴宅莲
施浒立 蔡贤德

著
翻译
审校

中国科学技术出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

GPS 伪卫星理论、设计与应用/(美)斯图尔特·科布著;耿建平等译. —北京:
中国科学技术出版社,2005. 8

ISBN 7-5046-3960-5

I. G... II. ①斯... ②耿... III. 全球定位系统(GPS)—
基本知识 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 136967 号

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:6.75 字数:150 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

定价:25.00 元



本书由中国科学院知识
创新工程重大项目资助出版

摘 要

伪卫星(地基发射机)可以在几秒钟内初始化载波—相位差分 GPS(CDGPS)导航系统来达到实时动态定位小于 $1\text{cm}(1\sigma)$ 的精度。以前的 CDGPS 系统已极少使用,因为累赘的初始化过程长达 30 分钟,而通过伪卫星来初始化载波—相位整周模糊度则消除了这个制约因素。本文将叙述用于 CDGPS 应用的经过优化设计的伪卫星,其费用比以前的伪卫星减少了两个数量级。

本文也对从全球定位系统(GPS)卫星获得定时的同步伪卫星进行了介绍。同步伪卫星可以替代 CDGPS 参考站和数据链,同时也可以初始化 CDGPS 导航,即使在只有一颗 GPS 卫星的信号可用的情况下,通过适当放置一组同步伪卫星也能使 CDGPS 导航。

本文设计了一种由伪卫星和同步伪卫星来实现初始化的 CDGPS 系统的原型,并对其开展了试验。该系统称为完好信标着陆系统(IBLS),其目标是在恶劣的天气为飞机着陆提供精确和可靠的导航。得到了该系统的飞行试验结果,包括由 IBLS 控制的波音(Boeing)737 客机的 110 次全自动着陆的结果。

本文还介绍了现有伪卫星的应用情况,包括室内导航实验的 GPS 星座仿真;研制了同步伪卫星导航算法并对其进行了分析;提出了伪卫星和同步伪卫星的新的应用;给出了关于远—近问题的理论和实际工作等。

前 言

以全球定位系统(GPS)为代表的卫星导航定位系统近年来得到广泛的应用,相关技术层出不穷。GPS 伪卫星作为 GPS 星座的有机组成和补充部分,能够改善 GPS 系统星座的布局,减小几何精度因子(DOP),改善定位精度,特别能够提高垂直方向的导航定位精度,从而成为 GPS 发展的新技术,有望开拓新的应用领域,适应新的使用要求。

目前已经有现成的 GPS 伪卫星商品问世。

2003 年,我们从美国 Stanford 大学的网上找到了 H. Stewart Cobb 的博士论文 GPS PSEUDOLITES: THEORY, DESIGN, AND APPLICATIONS。我们发现该文对从事导航研究和对伪卫星技术感兴趣的人员具有很好的参考价值。为了推动我国卫星导航技术的发展和应,我们征得 H. Stewart Cobb 博士的同意及授权,特将全文翻译出版,希望更多的读者从中受益。

全文包含 7 章,对伪卫星的基本概念、伪卫星的种类、伪卫星的信号设计、伪卫星设计时应考虑的主要问题、使用伪卫星导航的算法、远—近问题的解决方法以及接收机的改动等进行了详细的论述。

本书第 2 章由张巨勇翻译,第 3 章由尚俊娜翻译,第 5 章和第 6 章由吴宅莲翻译,耿建平翻译了其他第 1 章、第 4 章和第 7 章,施浒立研究员和蔡贤德高工对全书作了审核。由于译审者的水平有限,差错在所难免,恳请读者不吝指正。来信请发电子邮件到 jianpinggeng@yahoo.com.cn。

译审者·北京
2004 年 5 月

致 谢

没有许多他人的努力就不会有本研究。其中最主要的是我的导师 Brad Parkinson 教授,他早在 20 年前就指导了最初的 GPS 的研制,并筹措了资金,使 GPS 研究成为可能和实现。我从他那里学到了技术、领导才能和管理能力。David Powell 教授用他自己的 Piper Dakota(N4341M)飞机支持该研究,引导了多次飞行试验,并在现场传授给我动态控制理论知识。Per Enge 教授以出色的电子工程和估计理论来指导我。Jonathan How 和 Donald Cox 教授听取和分析了我的论文答辩,并表示了赞许。对所有这些人的专业知识、友谊和支持表示感谢。

最初的 IBLS 团队的其他 3 个成员为 Clark Cohen、David Lawrence 和 Boris Pervan。Clark 提出了 IBLS 概念,Boris 创建了整周初始化算法,Dave 编写了实时导航算法并对数据进行了分析。作为一个团队,我们分享成功和挫折,一起设计和重新设计,一起讨论,一起旅行,一起生活。最终,我们克服了所有面临的障碍,取得了胜利。

GPS 小组的其他人员也对本研究提供了许多支持。Andy Barrows 调试了无线电数据链路,后来作为 IBLS 派遣人员去了德国。Gabe Elkaim 在挖洞和准予挖洞方面都是行家。Konstantin Gromov 帮助制作调制器、接口和所需的其他硬件和软件。Renxin Xia 设计了简单伪卫星的核心——可编程逻辑芯片中的电路。Chris Shaw 设计并建造、安装了不受天气影响的伪卫星房子。Todd Walter 和 Changdon Kee 提出过一些设计思想和建议。Jock Christie、Mike O'Connor、Jennifer Evans、Y. C. Chao 和许多其他人帮助装卸、移动、安装和找回每次测试所需的堆积如山的设备。感谢上述所有的人,同时也对 Kurt Zimmerman、Paul Montgomery、Jonathan Stone、Carole Parker 和 Mike Ament 对本文提出的建议表示感谢。

试验飞行员有美国联邦航空局(FAA)的 Keith Biechl、联合航空公司(United Airlines)的 Bill Loewe、T. U. Braunschweig 的 Manfred Dieroff 和前面提到的 David Powell。为了开展实验和对设计进行验证,他们甚至冒着生命危险。Steve Kalinowski、Mark Ostendorf、Lutz Seiler 和 Elsinore 航空的人们帮助在具备飞行条件的各种飞机上安装 IBLS。FAA 的 Victor Wullschleger、联合航空公司的 Gerry Aubrey 和 T. U. Braunschweig 的 Andreas Lipp 与他们的机构协商主办我们的飞行试验。没有这些人辛勤的付出,决不会有 IBLS 试验。

没有飞机就不能进行飞行试验,没有机械师就不能保障飞机的安全飞行。感谢 PAO 的 Alberto Rossi 和他的同事们、ATC 的 FAA 机械、SFO 的联合维护工作人员和 BWE 的 Aerodata 团队,他们的辛勤工作保证了我们在空中的安全。

GP-B 的办公室职员给予我巨大的支持。文中的许多照片由 Denise Freeman 拍摄。通过 Sally Tsuchihashi、Mindy Lummm 和 Jennifer Gale-Messer,我保持与外界的联系,使我每天都心情愉快。

Trimble 导航公司允许我们打折购买他们的接收机,并且可以修改他们的接收机软件来跟踪伪卫星。FAA 资助了大部分研究,准许号为 93G004。早期工作是在 NASA 的 188BN002 准许号下进行的。

最后,感谢我的家人。我的父母 Hank 和 Mary Jane,是他们培养了我的好奇心火花,并用玩具、工具和书本将我的好奇心火花扇成了火焰。感谢我的两个兄弟 Mitchell 和 Tucker 对我的帮助和同情。没有他们的支持,我的学位论文就不会完成。谢谢你们大家,对你们的感谢我无法用语言表达。

H. Stewart Cobb

目 录

第 1 章 引言	(1)
1.1 动机	(2)
1.2 背景	(3)
1.2.1 码—相位 GPS 导航	(3)
1.2.2 差分 GPS	(3)
1.2.3 载波—相位差分 GPS	(4)
1.2.4 整周模糊度求解方法	(4)
1.2.5 远—近问题	(4)
1.3 以前的工作	(4)
1.4 贡献	(6)
1.4.1 简单伪卫星	(6)
1.4.2 完好信标着陆系统	(6)
1.4.3 同步伪卫星	(6)
1.4.4 脉冲伪卫星	(7)
1.4.5 设计准则和考虑	(7)
1.5 术语	(7)
1.6 论文纲要	(8)
第 2 章 伪卫星概念	(9)
2.1 码—相位 GPS 导航	(9)
2.1.1 伪距测量	(9)
2.1.2 导航算法	(10)
2.1.3 直接测距伪卫星	(11)
2.1.4 移动伪卫星	(13)
2.2 差分码—相位 GPS	(13)
2.2.1 数字链路伪卫星	(13)
2.3 载波—相位差分 GPS 导航	(14)
2.3.1 载波—相位模糊度	(14)
2.3.2 载波相位模糊度求解	(15)
2.3.3 使用伪卫星的模糊度求解法	(16)
2.4 同步伪卫星	(18)
2.4.1 同步伪卫星差分测量	(19)
2.4.2 同步伪卫星反射时延	(20)
2.4.3 同步伪卫星差分导航	(21)
2.4.4 同步伪卫星导航的几何特征	(22)

2.4.5	未知时延的同步伪卫星导航	(24)
2.4.6	单颗同步伪卫星导航	(25)
2.4.7	单颗卫星的操作	(26)
第3章	实际考虑	(27)
3.1	GPS 卫星信号	(27)
3.1.1	C/A 码相关特性	(28)
3.1.2	信号与噪声功率电平	(29)
3.1.3	码分多址(CDMA)	(30)
3.2	远—近问题	(31)
3.3	现有 GPS 接收机	(32)
3.4	远—近容忍	(34)
3.4.1	轨迹约束	(34)
3.4.2	天线方向图	(35)
3.4.3	分立的天线	(35)
3.5	远—近问题的解决办法	(36)
3.5.1	带外发射	(36)
3.5.2	频率偏移	(37)
3.5.3	跳频	(38)
3.5.4	新的扩频码	(39)
3.5.5	脉冲发射	(39)
3.6	脉冲伪卫星信号	(39)
3.6.1	脉冲消隐	(40)
3.6.2	接收机饱和特性	(40)
3.6.3	脉冲占空比	(42)
3.6.4	脉冲模式	(43)
3.6.5	相互干扰	(44)
3.7	伪卫星的新扩频(PRN)码	(46)
3.7.1	额外的 C/A 码	(46)
3.7.2	多历元 C/A 码	(46)
3.7.3	较长的码	(47)
3.7.4	更快的码	(47)
3.7.5	P 码	(47)
3.7.6	多相码	(48)
3.7.7	模拟码	(48)
3.8	相位噪声	(48)
3.9	接收机改动	(49)
3.10	建议的接收机改进	(50)
3.10.1	码相位辅助	(50)

3.10.2 高动态范围	(50)
3.11 天线	(51)
3.12 合法性	(52)
3.13 体会和建议	(52)
第4章 伪卫星设计	(54)
4.1 简单伪卫星	(54)
4.2 脉冲伪卫星	(58)
4.3 同步伪卫星	(59)
4.3.1 自主完好信标(AIB)	(60)
4.3.2 机场伪卫星(APL)	(61)
4.3.3 第一个同步伪卫星的问题	(61)
4.4 同步伪卫星的改进	(62)
4.5 模拟同步伪卫星	(63)
第5章 伪卫星飞行试验	(64)
5.1 完好信标着陆系统(IBLS)	(64)
5.1.1 导航性能要求	(64)
5.1.2 IBLS 系统介绍	(64)
5.1.3 IBLS 飞行试验	(66)
5.2 自主完好信标(AIB)	(71)
5.3 脉冲同步伪卫星(APL)	(72)
第6章 伪卫星应用	(76)
6.1 飞机应用	(76)
6.1.1 飞行检查	(76)
6.1.2 十三维的精度	(76)
6.2 陆地应用	(77)
6.2.1 机器人拖拉机	(78)
6.2.2 采矿	(79)
6.2.3 汽车	(79)
6.2.4 思考	(80)
6.3 室内导航	(80)
6.3.1 空间机器人	(80)
6.3.2 空间结构	(81)
6.3.3 思考	(82)
第7章 结论	(84)
7.1 结果和贡献	(84)
7.1.1 简单伪卫星	(84)
7.1.2 CDGPS 初始化	(84)
7.1.3 室内 GPS 导航	(84)

7.1.4	同步伪卫星	(84)
7.1.5	远—近比	(84)
7.2	对未来研究的建议	(85)
7.2.1	同步伪卫星 CDGPS 参考站	(85)
7.2.2	多个同步伪卫星导航	(85)
7.2.3	消隐接收机	(85)
7.2.4	高动态范围接收机	(86)
7.2.5	远—近问题研究	(86)
7.2.6	较高的频率	(86)
7.2.7	应用	(86)
7.3	总结	(86)
附录 A		(87)
附录 B		(90)
参考文献		(91)
插图清单		(96)

第1章 引言

乍一看,时间和位置在概念上没有什么共同点。“我在哪里?”和“现在是什么时间?”看起来完全是两个毫不相干的问题,是运动(位置随时间的改变)将二者联系在一起。如果你不运动,那么就能很容易地确定你在何处。如果你在运动,那么就只能说在某个瞬间你在何处,即“我此刻在哪里?”。如果你的参考点也在运动,那么你的位置精度就取决于你的时钟精度。

18 世纪的船长们使用 John Harrison 的航海计时器来测量天空中恒星的运动,据此计算出航行时的经度和纬度。以后大多数导航技术的进步,从雷达到罗兰,再到新出现的全球定位系统(GPS),都依赖于守时的进步。随着时钟技术的飞速发展,时间是科学家在所有可能测量的物理量中可以非常精确测量的一个物理量。实际上,位置的基本单位——“米”的定义是光以其不变速度在一特定的时间段内传播的距离。GPS 则把这个定义倒过来使用。

GPS 的核心是围绕地球运转的 24 颗导航卫星上的 24 台原子钟。这些原子钟使用核物理来精确报时,精度差不多是一百万年只差一秒。每台时钟控制一个发送精确定时信号的无线电发射机,在地球的半个表面上都可以接收到卫星上无线电发射机发射的信号。手持式 GPS 接收机可以选取其中几颗卫星的信号。信号从卫星到达接收机需要时间,就像从看到闪电到听到雷声一样需要一段间隔时间一样。

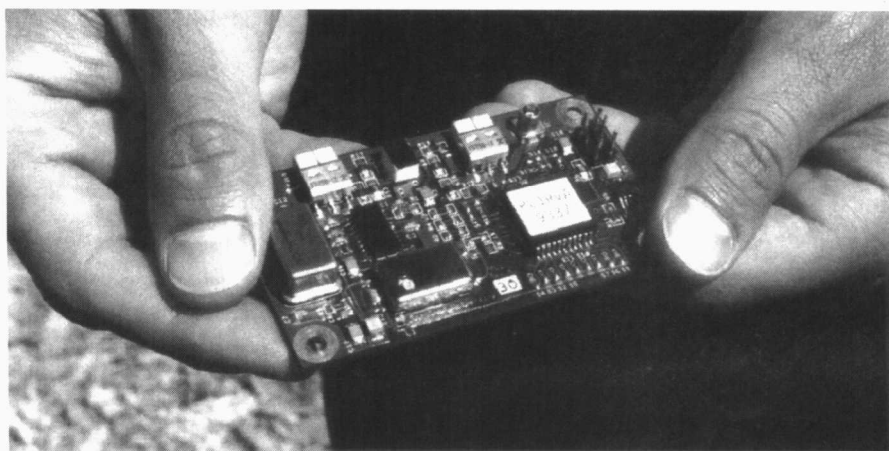
因为卫星时钟很准确,可以认为接收机接收的信号是在卫星上同时发射的。接收机通过比较各个卫星信号之间的延迟计算出其在地球上的位置,误差为一个篮球场那么大。

这样的精度已经足够满足在广阔的天空和海洋中导航的需要。但是,当飞机靠近跑道或港口时就需要更高的精度。这种情况下,接收机可以利用差分 GPS 校正信号。

校正信号来自地面上的一个接收机,其位置是精确测绘过的。该接收机不停地计算其已知位置与根据卫星计算出的位置之间的差值,然后将这个差值以接收机可以接收的无线电信号发射出去,这个差值对附近的所有接收机来说基本上是相同的。接收机使用这个校正量可将误差减少到像棒球投手的土墩^①那么大。

有时候,即使是这样的误差也太大。例如,飞机在恶劣的天气着陆时,位置误差不应超过家用的碟子那么大。普通的差分 GPS 达不到这样的精度。但如果将许多 GPS 发射机放在靠近机场的地面上,飞机就可以使用“载波—相位差分 GPS”来导航,在整个下降过程以一个棒球那么大的误差实现安全着陆。这些地基 GPS 发射机称为“伪卫星”,是本文的研究主题。图 1.1 为本研究项目中研制的伪卫星。

① 棒球投手在投球时要站在一个土墩上,土墩的直径为 18 英尺(1 英尺 $\approx 0.3\text{m}$)。——译者注



廉价的伪卫星(如图中所示)可以初始化载波—相位差分 GPS(CDGPS)来达到厘米级的导航精度

1.1 动机

现代工业社会对精确和可靠的导航方法的需求越来越高,越来越紧迫,以便使各种系统的失败、延迟和代价逐步下降。例如,联邦航空局(FAA)最近提出的“零事故”政策要求客机从起飞到着陆阶段都能够正确导航;建筑工人必须在精确的位置挖洞,以免引起火灾或大范围的灯火管制;现代农业机械可改变每条犁沟所需的土壤调节器和种子的数量,以此来优化整个农场的农作物产量;采矿的成功取决于采矿机器定位矿石而不是脉石的能力。所有这些应用都对导航技术提出了更高的要求。

GPS 卫星导航是解决导航定位问题的一种革命性方法。在地球上,不管任何时刻、任何天气和任何地点,接收机都可以接收几颗卫星的信号来计算其位置,而且可以达到前所未有的精度。民用接收机四种不同的工作模式下的 1σ 精度如图 1.2 所示,摘自[2,第 1 章]。

导航模式	水平精度(1 σ)
单独使用 GPS(W/SA)	40m
广域差分 GPS	3m
局域差分 GPS	1m
载波相位差分 GPS	0.01m

图 1.2 民用 GPS 导航模式的近似精度

载波—相位差分 GPS(CDGPS)的实时精度(约 1cm, 1σ)是最高的,但到目前为止,CDGPS 在实际中却很难实现。CDGPS 的精度是通过精确测量载波的小数相位获得的,但前提是必须精确知道载波的整周数。目前,确定整周数还很难,而且很费时。CDGPS 系统必须等待 10 分钟或更长时间的卫星运动来求解整周数,或者在系统每次初始化时要回到一个精确已知的位置。有些特定系统使用专门的姿态测量设备可以快速求解整周数,

但还不能通用,也就是没有通用的求解整周数的方法。一些想达到 CDGPS 精度而又想快速初始化的系统被迫使用,诸如电子光学之类的其他定位技术。

本文提出的技术使确定载波一相位整周数所需的时间和由此带来的费用都减少了两个数量级,从而使 CDGPS 导航能够更广泛地应用。在一个定义的小于 10km 左右的空间内,使用 CDGPS 和本文介绍的简单伪卫星能够满足厘米级实时导航精度的应用要求。

本文对同步伪卫星也进行了介绍,同步伪卫星可进一步简化 CDGPS 系统。同步伪卫星可以想像成一面从地面上的一个已知点反射 GPS 卫星信号的电子镜。同步伪卫星可以作为 CDGPS 的参考站和初始化设备,这样就不必将差分参考站分开,也不需要有关的数据链路。通过将参考发射信号的延迟从秒级减少到毫秒级,同步伪卫星增加了自动控制系统中的位置反馈环的允许带宽,实际上是消除了选择可用性(SA)时钟抖动的影响。

1.2 背景

本节只对 GPS 概念作简单的介绍。关于 GPS 技术和应用的完整介绍可参阅最近的两卷“蓝皮书”[1,2]。《导航》杂志中有关 GPS 的文章收集在四卷“红皮书”[3,4,5,6]中。实际的 GPS 信号格式的政府规范称为 IDC-200[7]。

1.2.1 码一相位 GPS 导航

每颗 GPS 卫星发射一个调制在微波频率(称为 L1)上的可复现的类噪声的数字码信号(称为 Gold 码)。码和载波信号的定时由卫星上的原子钟精确控制。GPS 接收机内产生一份 Gold 码和载波的本地复制,使其与要接收的卫星信号的定时匹配,这样就可接收到该卫星的信号。Gold 码的设计可使接收机同时接收多路信号。

信号从卫星以光速到达接收机的延迟约为 70ms。延迟的准确值取决于卫星到接收机的准确距离,而这个距离总是在变化。接收机通过比较四颗卫星的延迟,采用三角测量法计算出自己的位置。

大部分接收机通过度量数字 Gold 码的定时(称为码相位)来测量信号的延迟。Gold 码位(称为码片)以 1.023MHz 的速率发射,故每个码位约 293m 长。对于强信号的延迟,接收机测量的精度在一个码片长度的百分之几以内,即约 0.5m。这样,即使不考虑其他误差的影响,也限制了码一相位 GPS 导航的精度。

1.2.2 差分 GPS

由于许多因素的影响,接收机测量的卫星信号的延迟包含多种误差。其中一些是:卫星钟误差、卫星位置误差、电离层和对流层密度的变化和靠近接收机物体的“多径”反射。这些误差合起来产生约 10m(水平, 1σ)的位置误差。在写作本文时,人为地加大了卫星钟误差使定位误差大于 41m(水平, 1σ)[1,第 11 章]。这是美国政府为实施选择可用性(SA)政策而故意添加的时钟误差。

在方圆几百公里的范围内,上述大部分误差对所有接收机都是一样的。安放在精确已知位置上的 GPS 接收机可以测量出这些误差,将这些误差进行校正,并将校正量广播

给附近的其他接收机。这种技术叫做差分 GPS 或 DGPS。使用具有差分 GPS 校正的码—相位 GPS 导航, 移动的接收机可以将位置误差减少到约 2.2m (水平, 1σ) [2, 第 1 章]。

1.2.3 载波—相位差分 GPS

当需要更高的精度时, 某些 GPS 接收机可以用卫星信号的载波和 Gold 码来测量延迟。载波周期只有约 19cm 长。接收机可以测量到载波相位(一个周期的小数部分)的百分之几, 即 1mm。虽然 Gold 码设计成每个码片互不相同, 但每个载波周期却是相同的。接收机可以直接测量出载波周期的小数相位, 但整周数(称为整周模糊度)却必须间接求解。

企图通过整周数来测量卫星到接收机的延迟是很难的。建议采用的正确做法是, 在附近安放一台固定的 GPS 接收机进行载波相位测量, 然后将测量值发射给附近的用户接收机。这种方法称为载波—相位差分 GPS 或 CDGPS。整周模糊度给出了固定接收机与移动的用户接收机之间的整周数。一旦解出整周模糊度, 移动的用户接收机就可以计算出其相对于固定接收机的位置, 精度可达厘米级 [2, 第 15 章]。

1.2.4 整周模糊度求解方法

整周模糊度的求解有许多种方法。大多数都需要 10 分钟或更长的时间。这些方法无非就是收集并过滤数据, 或者跟踪卫星更长的时间。目前惟一可靠、较快的方法是, 在初始化整周模糊度时, 将移动的接收机放在一个已知位置(厘米级精度)上预先计算数据。但这些方法中没有一种在飞机从进场到着陆期间是方便的。

安放在已知位置的伪卫星为使用 CDGPS 导航的移动载体提供了一种快速、精确地初始化整周模糊度的手段。载体在经过伪卫星时收集几何信息, 根据这些信息求解整周模糊度, 且成功率高, 失败率极小(10^{-9})。

1.2.5 远—近问题

随着载体接近伪卫星, 载体接收到的伪卫星信号越来越强。事实上, 伪卫星信号可以变得很强以致于干扰相对较弱的远距离的 GPS 卫星信号。这种现象称为“远—近问题”。过去, 这个问题严重地制约了伪卫星的使用, 但是使用新的比如脉冲传输技术实际上可以消除这种制约。

现在, 在方圆 20km 或更小的范围内, 任何要求厘米级精度导航的车辆可以使用伪卫星辅助的 CDGPS 来导航。距离不是主要问题, 即使横贯大陆飞行的飞机也只在机场附近才需要这样的精度。本文所介绍的简单、廉价的伪卫星为广泛使用 CDGPS 导航扫除了最后的障碍。

1.3 以前的工作

伪卫星概念的出现要比 GPS 早。在第一颗 GPS 卫星发射之前, 曾在沙漠中使用安放在地面上的伪卫星对 GPS 概念进行了试验 [8]。从那时起一直到现在, 伪卫星就经常出

现在有关文献里。本节对伪卫星以前的工作进行了全面的回顾,其中对一些概念的详细解释将在下一章中叙述。

Klein 和 Parkinson[9]最早指出伪卫星是 GPS 系统的有益补充,可以改善导航可用性和如航空等关键应用系统布局的几何特性。这篇开创性的论文也介绍了远-近问题,并且提出了几种可选的解决方法,包括以短脉冲发射伪卫星信号。其中一种方法与本文所实现的几种伪卫星基本相同。

Parkinson 和 Fitzgibbon[10]开发并演示了一个搜索测距伪卫星最佳位置的程序。最佳位置是指在最坏情况下,其中一颗卫星又失效后,能实现导航精度最优化(DOP 最小)。

与此同时,开发了局域 DGPS 系统第一个标准的 RTCM-104 委员会[11]也提出了一种使用伪卫星发射 DGPS 信息的方法[12]。该方法包括了脉冲传输方案的详细规范。RTCM-104 脉冲方案也与本文的方法基本相同。

目前,A. J. van Dierendonck 是伪卫星方面撰文最多产的作者。从 20 世纪 80 年代后期开始,他已经撰写了许多有关伪卫星应用的文章。其中一篇文章[13]建议改进 RTCM-104 标准,包括使用不同的脉冲模式和 30kHz 的频率偏移来使最坏情况下对卫星信号的干扰时间减少到最低。另一篇文章[14]提出了另一种脉冲模式和一种长度扩展的伪随机码。第三篇文章[15]提出了使用在 L2 频率上发射脉冲 P 码的伪卫星来辅助海军航空导航的方法。后来,Kovach 和 Fernandez[16]也提出了使用加密 Y 码的类似概念。

最近,van Dierendonck 与 Stanford 电信的 Bryant Elrod 小组一起对伪卫星的航空应用[17,18]进行了飞行试验实践。伪卫星以脉冲方式发射,载波频率偏移 L1 频率 1.023MHz (C/A 码片速率)。虽然期望频率偏移能够消除对卫星信号的干扰,但 Rockwell 的 Gary McGraw 后来介绍说,在最坏情况下互相关性只减少了 3.6dB[19]。

据报道,Stanford 电信制造了一组脉冲伪卫星用于试验,试验由 Strategic Defense Initiative 大概在 1990 年进行。在 ION-GPS-90 会议[20]上发表的文章[15]被会议上的另一篇文章引用,但实际上第一篇文章没有出现在会议论文集上。这篇文章清楚地介绍了在[21]中所介绍的项目的进展情况。其他对这篇文章的引用可以在文献[2]的第 52 页到第 612 页中找到。

Navsys 的 Alison Brown 和她的团队使用一个伪卫星和一个改装过的 GPS 接收机[22,23]来进行进场导航的飞行试验。他们从 GPS 的 L1 和 L2 频率以 100kHz 分割航空通信波段发射伪卫星信号,以回避远-近问题。显然,这需要使用有不只一个 RF 信道的非标准接收机。

Stanford 大学的 Awele Ndili 对伪卫星使用的新伪随机码族进行了研究[24]。这些新的码比现在伪卫星使用的 Gold 码对卫星的干扰小。

最近,Holloman 空军基地的一个团队使用移动伪卫星和固定接收机开发了一个倒 GPS 系统[25]。系统试验时,通过使伪卫星和接收机距离保持不变来避免远-近问题。

最新的伪卫星技术,除了本文所提到的以外,Elrod 和 van Dierendonck 在 1995 年已进行了总结[2,第 2 章]。

CDGPS 技术有着悠久的历史,而且硕果累累,是 GPS 测绘系统的基础。测绘是 GPS 的第一个商业市场。最初的“静态”测绘系统只能计算固定点间的角度和距离。最近研