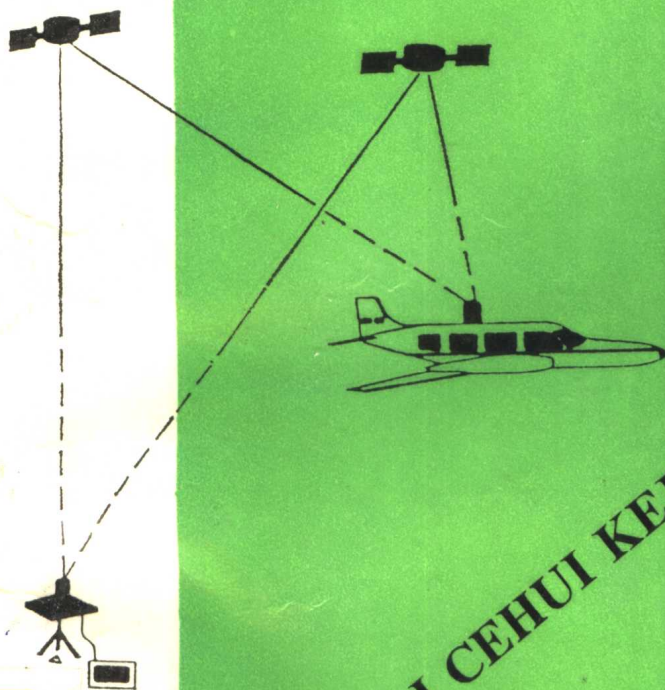


现代测绘科技丛书

GPS 用于摄影测量与遥感

李德仁 编著



XIANDAI CEHUI KEJI CONGSHU

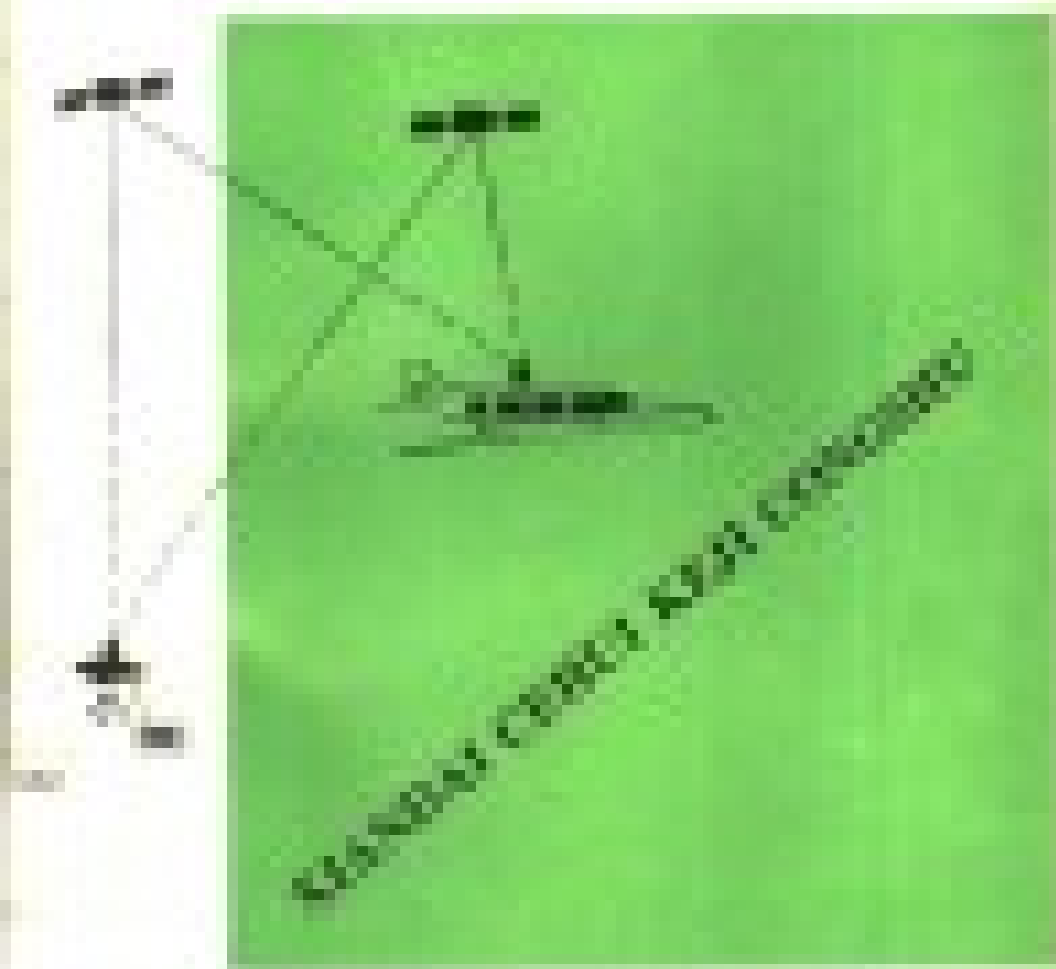
3162

测绘出版社

测绘遥感工程系列

GPS 用于摄影测量与遥感

张树江 编著



科学出版社

现代测绘科技丛书

GPS用于摄影测量与遥感

李德仁 编著

国家自然科学基金高技术项目研究成果

测绘出版社

• 北 京 •

内 容 简 介

本书全面而扼要地叙述GPS全球定位系统在摄影测量与遥感中的各种应用。主要内容包括:GPS在摄影测量与遥感定位中的应用原理与方法;GPS用于航测外业控制联测;GPS用于航摄导航;GPS辅助空中三角测量和星载GPS用于航天摄影测量与遥感。

本书着重讨论GPS与摄影测量和遥感的关系,以及在它们的结合应用中特有的一些技术关键问题。可供有关领域从事科研、教学和生产的科技人员,以及高等学校师生学习参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

GPS 用于摄影测量与遥感/李德仁编著. -北京:测绘出版社, 1996.6

(现代测绘科技丛书)

ISBN 7-5030-0805-9

I . G... II . 李... III . ①全球定位系统 (GPS) -应用-摄影测量②全球定位系统 (GPS) -应用-遥感 IV . P228

中国版本图书馆CIP数据核字 (95) 第 13222号

测绘出版社出版发行

(100045 北京市复外三里河路 50 号 (010)68512182)

大兴星海印刷厂印刷·新华书店总店北京发行所经销

1996 年 6 月第一版·1996 年 6 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32·印张: 6.75

字数: 175 千字·印数: 0 001—3 500 册

定价: 11.00 元

《现代测绘科技丛书》

编委会委员名单

主任委员：陈俊勇

副主任委员：宁津生 高 俊 张祖勋
楚良才 陈永奇 华彬文

委 员：（以姓氏笔划为序）

于来法	方 恒	田应中
朱华统	李德仁	陈绍光
张清浦	林宗坚	陶本藻
钱曾波	黄杏元	梁宜希
喻永昌	廖 克	潘正风

出版说明

《现代测绘科技丛书》是经国家测绘局批准列入我社“八五”重点出书规划的选题之一。其编写宗旨是对80年代以来测绘科技领域在新理论、新技术、新工艺等方面所取得的成果进行总结，整理成册，以期对改造传统测绘生产技术，提高劳动生产率和产品质量，形成我国现代测绘技术体系，发挥科技图书应有的作用；同时也为反映我国测绘科学研究水平，丰富我国测绘学术专著宝库服务。出版本套丛书也是为适应加速测绘科技成果转化，为现实生产力的需要。

本套丛书按专题成册。专题有两种类型：一类偏重学术性，主要反映我国测绘各专业近十年来在理论研究方面所取得的、能代表我国先进水平的新成就和某些老专家毕生研究成果的专著，以及测绘前沿填补国内空白的著作；另一类偏重应用技术，是本丛书的主体，其内容是在理论指导下以新技术、新工艺、新材料、新产品研究成果的推广应用为主，个别的配有实用软件。

由于GPS(全球定位系统)涉及测量界多方面的应用，内容较多，丛书中将分册配套编写，各册主题明确，内容相辅相成，组合起来GPS测量内容就显得比较完整，又发挥了各作者的专长。

丛书编委会于1992年1月成立，全体编委对丛书出版意图、读者对象，乃至每个选题及其内容都作了充分研究和讨论，在全国测绘界选择了有代表性的专家参加各个分册的撰写和审稿工作。按照计划，这套丛书的各分册将根据撰写完成情况先后定稿出版，陆续与读者见面。

前 言

从1978年2月22日美国国防部第一颗GPS (Global Positioning System) 全球定位系统试验卫星发射以来, 随着GPS卫星星座的逐步布设完成, GPS技术对全球导航和定位已经和正在发挥着越来越大的作用, 其中对测绘和遥感产生的影响尤为巨大。

在静态定位方面, 利用载波相位组合观测值已能达到 $1\text{cm} \pm 1\text{ppm}$ 、 $\pm 0.1\text{ppm}$, 乃至 $\pm 0.01\text{ppm}$ 的相对定位精度。正在发展的实时通讯的DGPS差分定位技术将逐步取代常规大地测量手段而成为高精度实时定位的重要手段。

在动态定位方面, 利用载波相位差分法可以精确测定运动物体(汽车、舰船、飞机及航天飞行器)的空间位置和轨道参数, 借此可实现无地面控制或稀疏地面控制的空中三角测量, 从而加快摄影测量和遥感的作业周期。正在发展的实时通讯, 或在飞行中自动测定整周模糊度的技术将有可能实现高精度导航。

GPS技术与遥感(RS)和地理信息系统(GIS)相结合, 即人们所通称的3S技术, 当然还要加上现代通信技术, 将会大大改变空间数据获取、存贮、更新和使用的方式, 使之成为一门现代的空间信息科学和技术, 而广泛地用于地球科学、环境科学、空间科学, 成为人们生活和社会持续发展中的必不可少的技术工具。

本书仅就GPS技术与航空、航天摄影测量与遥感的结合介绍最近十年来国际上取得的主要成就, 重点是叙述作者刚刚完成的国家自然科学基金高技术项目《星载GPS接收机测定卫星传感器位置与姿态可行性研究》和国家测绘局科技发展基金项目《GPS用于空中三角测量的试验研究》的主要研究和试验结果。旨在抛砖引玉, 推动我国GPS技术在这些方面的应用。应当说本书是上

述两个课题组全体成员共同研究的成果。课题组主要成员有李德仁教授(组长)、刘基余教授(副组长)、袁修孝副教授、王光高级工程师、陈小明博士、王树根副教授、朱宜萱副教授、李静年讲师、赵金祥工程师和兰慰等同志。由于大家的同心合力和四年的艰苦劳动,才有可能用自己的研究成果充实到本书之中。作者对他们做出的贡献表示崇高的敬意和衷心的感谢。

国家测绘局、中国测绘工程规划设计中心、武汉测绘科技大学、中国航空遥感服务公司、陕西省测绘局、国家测绘局中国测绘科学研究院、山西省测绘局和太原航空站以及国家自然科学基金委员会等单位,出于抓高新技术、推动航测和遥感应用上新台阶的目的,对本项研究给予了大力支持,在此谨向他们表示最衷心的感谢。

作者还要感谢测绘出版社倡导出版GPS系列丛书,从而使本书的出版成为可能。全书经毛可标研究员审校,作者向他表示感谢。

GPS在摄影测量与遥感中的应用正在迈出可喜的步伐,但它仍有许多技术问题需要解决,作者愿与国内外同行继续努力,共同攻关。愿这本小册子能推动GPS在我国摄影测量与遥感中的应用,并期待着用新的成果来充实它。由于作者水平所限,书中不妥之处,敬请读者不吝指正。

李德仁

1995年2月于武昌珞珈山

目 录

第一章 结论	(1)
§ 1-1 摄影测量与遥感中的定位问题.....	(1)
§ 1-2 GPS 全球定位系统概述.....	(3)
§ 1-3 GPS 用于摄影测量与遥感定位	(17)
第二章 GPS 用于航测外业控制联测	(23)
§ 2-1 GPS 航外控制联测的原理与特点	(23)
§ 2-2 GPS 联测像控点的作业步骤	(28)
§ 2-3 GPS 联测像控点中的高程问题	(31)
第三章 GPS 用于航摄导航	(40)
§ 3-1 航空摄影飞行中的导航	(40)
§ 3-2 GPS 技术用于航摄导航	(42)
§ 3-3 低成本 GPS 接收机用于轻型飞机面积航 空竖直接影	(49)
第四章 GPS 辅助空中三角测量	(55)
§ 4-1 GPS 辅助空中三角测量的基本概念	(55)
§ 4-2 GPS 测定摄影时刻机载天线中心坐标的 原理与方法	(60)
§ 4-3 机载 GPS 天线安装及与摄影机的偏心矢 量测定	(78)
§ 4-4 GPS 辅助的光束法区域网联合平差.....	(94)
§ 4-5 联合平差程序 WuCAPS 系统	(115)
§ 4-6 利用导航数据的光束法区域网平差的质 量分析.....	(124)
§ 4-7 GPS 辅助光束法区域网平差的试验结果.....	(135)
§ 4-8 GPS 辅助航摄仪内方位元素的测定	(151)
第五章 星载GPS用于航天摄影测量与遥感	(158)

§ 5-1	星载 GPS 测量技术及其应用·····	(158)
§ 5-2	CCD 推扫成像方式下星载GPS对地定位 的模拟试验研究 ·····	(188)
附录	GPS辅助机载激光断面测量·····	(200)
主要参考文献 ·····		(206)

第一章 绪 论

§ 1-1 摄影测量与遥感中的定位问题

一、摄影测量与遥感的几何定位

摄影测量与遥感是通过非接触传感器获得所摄目标的影像，从中提取有关目标的形状、大小、位置、性质和相互关系的一门学科。例如，人们通常利用航空摄影测量和遥感方法来获取地球表面上的自然和人工地物的上述信息，以测制和更新各种不同比例尺的地形图或专题图，为各种地理信息系统建立地球表面的空间数据库。用现代计算机科学和信息科学的语言讲，摄影测量与遥感是由影像提取各种语义和非语义信息，即所谓的几何信息和属性信息。用通俗的话来讲，就是要解决“在哪儿”（Where?）和“是什么”（What?）这两大问题。

摄影测量与遥感的定位要解决的正是“在哪儿”这个几何问题。从原则上讲可区分为空对地和地对空两种方法。

所谓空对地方法，是用各种直接测量方法求出摄影机或传感器的空间位置和姿态，然后用前方交会的方法，确定像片上任一目标在实际空间中的位置。而地对空方法是利用已知空间坐标的若干地面控制点及其在像片上的构像，先求出像片的外方位元素，进而可确定出像片上任一目标的空间位置。利用控制点同时解求像片外方位元素和未知点的空间坐标，称为整体一步求解，又称解析空中三角测量。

二、摄影测量定位方法

摄影测量中的定位方法通称解析空中三角测量，或称摄影测量加密。

以航空摄影测量而言,在航空摄影中必须按照60%航向重叠和20~30%旁向重叠摄取地面的像片,然后利用地面上若干已知空间坐标和/或高程的控制点,对量测的像点坐标或模型坐标进行平差处理,从中解求像片外方位元素和地球表面上各点的空间坐标和高程。

摄影测量测定点位空间位置的特点在于:不触及被测目标,可在大范围内同时进行,不受地面通视条件的限制,区域内平差结果精度相当均匀,且不受区域大小的限制。

用摄影测量方法测定点位的目的是:

——为测绘地形图提供定向控制点;

——为制作像片平面图和正射影像图提供定向控制点和像片方位元素;

——取代大地测量方法进行三、四等或等外三角测量,要求达到厘米级精度;

——用于地籍测量以测定较大范围内界址点的坐标,或为测定界址点提供密集的控制网格;

——单元模型中解析计算大量点的地面坐标用于诸如数字高程模型和桩点法测图;

——解析法近景摄影测量和各种非地形摄影测量应用。

用于地形测图的摄影测量加密要求的精度较低,用于其它各种目的则属于高精度摄影测量加密。

由于利用了电子计算机和现代平差计算方法,可以采用较为严密的独立模型法和光束法平差,并可顾及系统误差的补偿和粗差的探测。关于这方面的理论可参见文献[1]和[2]。

为了实现摄影测量定位,除了需提供像点坐标观测值外,还需要提供一些非摄影测量信息。这主要指使空中三角测量网纳入规定物方坐标系所必要的基准信息,也要考虑到各航带构网求解时的几何可测定性和对像片系统误差的有效改正。长期以来,人们主要是利用大地测量方法测定在像片上满足良好分布条件的

若干控制点。这项工作与野外像片判读与调绘构成了航测外业工作的主要任务。

三、遥感定位方法

遥感影像通过各种型式的传感器获得。除了框幅式面中心投影与航空摄影测量完全相同外，还有线中心投影如法国 SPOT 像片，扫描仪成像如美国 TM 图像，以及距离投影方式的合成孔径雷达 SAR 图像等。

遥感影像也有能构成有充分航向和旁向重叠的影像如通常的航空摄影一样，这主要是航天摄影机和 CCD 线阵扫描仪影像。利用这些影像定位，完全等同于航空像片的空中三角测量。

如果遥感影像无足够立体重叠，则只能通过对其进行几何纠正而获得正确的位置。严格的方法是利用传感器的位置和姿态参数和数字高程模型实现几何纠正和定位，从而可获得任一影像目标的三维空间坐标 X 、 Y 、 Z 。传感器的位置和姿态可借助仪器实际测定，也可利用若干必要的地面控制点反求。近似的方法是从实地或已有的地图上获得足够密度的控制点，对照它们在遥感图像上的构像，用局部拟合和插值方法实现逐像元几何纠正，从而获得它们的实地坐标。

综上所述，不论摄影测量还是遥感影像，要解决其对地定位问题，必须依赖于必要的地面控制点或测定传感器在空间的位置和姿态。要想加快摄影测量和遥感数据处理速度，减少外业工作量，必须设法自动、快速和精确地测定传感器的空间位置和姿态。全球定位系统（英文缩写为 GPS）正是最近几年来人们一致公认可用于此目的的最好工具。

§ 1-2 GPS 全球定位系统概述

一、NAVSTAR 全球定位系统（GPS）

GPS 全球定位系统是英文 Navigation Satellite Timing and

Ranging/Global Positioning System的字头缩写词NAVSTAR-AR/GPS的简称。它的含义是：导航卫星测时和测距/全球定位系统。该系统是美国国防部自70年代初开始研制的新一代卫星导航和定位系统。到1994年24颗在轨卫星组成了实用的运行系统。该系统能连续地向地面发射信号，供地表面或海、陆、空各种交通工具的固定和移动接收机天线所接收，从而实现在地球上任何地方和任何时刻的自动定位。除了能进行原先设计的实时导航外，通过对数据的离线后处理也可用作高精度定位，这样就引

起了大地测量、摄影测量以及其它定位目的的专业人员的极大兴趣。

GPS卫星均匀分布在六个相对于赤道的倾角为 55° 的近似于圆的轨道面上，而轨道间的夹角为 60° ，轨道平均高度为20200km，12恒星时绕地球一周，这样的布局可以保证地球上任何地方能在任一时刻同时收到四颗以上GPS卫星的信号(见图1-1)。

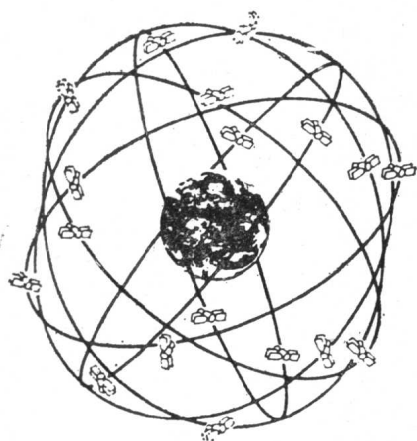


图 1-1 NAVSTAR GPS
全球定位系统

5个常设地面站通过连续不断的测量来控制 and 监测整个系统，从而每隔8小时将轨道数据、系统时钟、电离层折射参数、管理数据和技术数据，以及26小时预测数据的更新结果发送给卫星，并通过卫星供给用户使用。

由于本书属于GPS系列丛书之一，故不打算也不可能在此详细介绍GPS的系统设计、控制和技术运行，对此读者可参考本系列的其它各册有关章节。这里仅仅扼要地介绍与GPS在航测和遥

感中应用有关的主要作业特点。由于GPS卫星已全部投入使用，目前世界上绝大部分地区，每天均可能有几个小时可以收到6颗或更多的GPS卫星信号。

下面先介绍一下GPS信号的特点。

每颗卫星连续发射两种频率的电磁波信号： $f_1 = 1575.42$ MHz和 $f_2 = 1227.60$ MHz。这就是众所周知的波长分别为 $\lambda_1 = 19.0$ cm和 $\lambda_2 = 24.4$ cm的 L_1 和 L_2 载波。作为载波载有两类调制信号：一类为导航信号，另一类为电文信号。导航信号又分为两种，码率分别为1.023 Mb/s 和 10.23 Mb/s。前者信号编码1 ms重复一次，用来快速捕获导航信号，称为捕获码，仅用于粗略定位，故又称为粗码(C/A 码)，其波长 $\lambda \approx 300$ m，它仅调制在 L_1 载波上。后者七天重复一次，且各颗卫星不同，码的变化结构十分复杂，不易捕获，但能用于精密定位，故称为精码(P 码)，其波长 $\lambda \approx 30$ m，调制在 L_1 和 L_2 载波上。两种码都是人为编制的一类类似噪声的信号码，故称伪随机噪声码。电文信号同时以50 bit/s的速率调制在 L_1 和 L_2 上。电文内容包括卫星星历表、各项改正数和卫星工作状态等。每帧电文播发30 s，共1500 bit，分为5个子帧，各300 bit。借助电文信号，接收机可以选择图形最佳的一组卫星进行观测，以利于定位数据的处理。

P码和C/A码信号可用来实时地测定卫星和接收机之间的直接距离，称为伪距法。载波则可用作无码相位观测值。若不计系统误差，所测卫星与接收机间距离的内精度大约为波长 λ 的1%。按此推算，P码和C/A码信号可以达到0.3 m和3 m的距离精度，而利用载波相位观测值则可望达到2 mm的内精度(见图1-2)。

P码和C/A码信号能实时获得中等精度定位结果的能力使之十分方便，可用于实时导航中。载波相位观测值尽管它不便实时作业，但它潜在的极高精度，使得大地测量和摄影测量工作者极为关注。

P码目前在许多国家是可利用的，但美国国防部随时均可

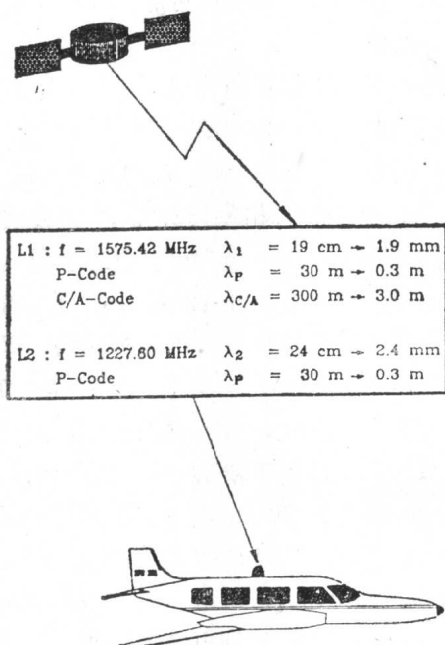


图 1-2 GPS卫星信号及其内精度

以将它只限于美国军用。为了阻止各国利用GPS实时定位的好处，美国国防部采用了所谓“有选择可用性”（SA）技术，按照不规则间隔将GPS伪距法精度降低10倍，这样一来，C/A码定位精度实际上只能达到100m左右。

GPS定位的基础是同时获得一接收机与几个GPS卫星之间的距离观测值。该距离观测值实质上是一个时间差 Δt ，即信号从发射到接收之间的时间差。将 Δt 乘以电磁波的速度便得到距离。对于GPS而言仅仅是单向测程。因此， Δt 的精度至关重要，它取决于卫星上的时钟、GPS信号脉冲的时钟与接收机上的时钟之间的同步。仅差1ns（纳秒）就相当于30cm。卫星上装的是原子时

钟，每日的相对频率稳定误差达到 10^{-13} ，而接收机上的石英钟，其精度则低得多。因此时钟误差可能很大，而且波动也可能大。大的时钟误差必然导致大的距离误差。因此，GPS定位一般均采用伪距法，而不直接将它换算成距离。对于P码和C/A码伪距观测值的每一周期，接收机的时钟误差均处理为未知数在平差处理中一起求解(见图1-3)。

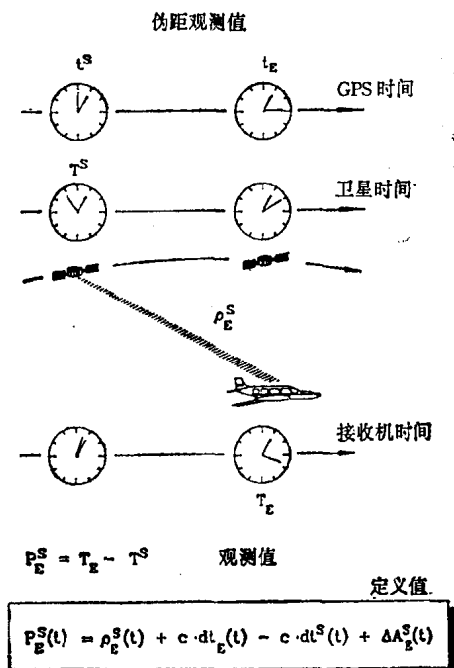


图 1-3 伪距观测值及时钟误差

载波相位观测值则与之不同。GPS卫星传来的余弦波相对一个参照波加以量测，进来的余弦波小于1个波长的相移值被量测，从卫星传到接收机的整周期数是未知的，其值约为 10^6 量级。该值称为整周模糊度(ambiguity)，必须通过离线方式加以测定。这就是不能由载波相位观测值直接得到距离的原因。一旦初始模