

GPS 原理与应用

迟运祥编著

山东省地图出版社

前言

全球定位系统(GPS)是由美国国防部出资 130 亿美元所研制的导航定位授时系统, 由 24 颗等间隔分布在 6 个轨道上大约 20000 km 高度的卫星组成。该系统具有高精度、全天候和全球覆盖能力, 它将于不久的将来取代目前所有的无线电导航系统。

全球定位系统的迅速发展, 引起了各国军事部门和广大民用部门的普遍关注。特别十多年来, GPS 定位技术在应用基础的研究、新应用领域的开拓、软件和硬件的开发等方面都取得了迅速发展。目前, GPS 除了在军事领域得到广泛应用以外, 在民用方面也已广泛应用于航空与航海的导航与定位、大地测量、遥感、石油勘探、地震测量、野外救生、探险、森林防火、飞机播种、农田耕种、车辆自主导航、特种车辆导航、机场和港口的交通管理等领域。

我国的 GPS 应用发展势头极为迅猛, 短短的十多年间, GPS 在我国的应用已从少数科研单位和军事部门迅速扩展到各个民用领域, GPS 的广泛应用改变了人们的工作方式, 提高了工作效率, 为整个社会带来了巨大的经济效益。可以说, GPS 在我国各个领域的应用还刚刚开始, 其未来的应用前景十分广阔, 市场潜力也是非常巨大的。

本书共分六章, 其中, 第一章为概述, 简要介绍了 GPS 的发展概况, GPS 的基本构成等。第二章简单介绍了地球的坐标系统和时间系统。第三章介绍了 GPS 卫星的轨道和卫星星历。第四章介绍了 GPS 在民用方面的应用。第五章介绍了 GPS 在军事领域的应用。第六章简要介绍了 GPS 在海湾战争中的应用。

GPS 导航定位技术是一门由多学科互相渗透而形成的新兴学科，其理论尚有待于进一步完善，应用领域也在不断拓宽，由于作者水平有限，书中错误与不当在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

1999年8月18日

目录

第一章 概论.....	(1)
第一节 GPS 定位技术的发展及特点.....	(1)
1.1.1 GPS 的发展.....	(1)
1.1.2 GPS 的特点.....	(3)
第二节 GPS 的组成概况.....	(4)
1.2.1 GPS 空间星座部分.....	(4)
1.2.2 地面监控部分.....	(8)
1.2.3 用户设备部分.....	(9)
第三节 美国政府对 GPS 用户的限制性政策与用户的措施.....	(10)
1.3.1 当前美国对 GPS 用户的主要限制性政策.....	(10)
1.3.2 非特许用户对美国限制性政策的措施.....	(12)
第二章 时间、地球自转、参考系和大地测量标准.....	(16)
第一节 时间系统.....	(16)
2.1.1 动力时.....	(16)
2.1.2 原子时.....	(17)
2.1.3 恒星时.....	(18)
第二节 天球和地面参考系.....	(18)
2.2.1 地球的空间运动.....	(18)
2.2.2 GPS 参考系的实际应用.....	(19)
第三节 习用地面坐标系统与大地测量基准的关系.....	(21)
2.3.1 换算模型.....	(22)
2.3.2 实践的体会.....	(24)
第三章 GPS 卫星轨道及卫星星历.....	(26)
第一节 GPS 卫星轨道.....	(26)
3.1.1 卫星轨道在 GPS 定位中的意义.....	(26)

3.1.2	影响卫星轨道的因素及其研究方法.....	(26)
3.1.3	卫星运动的开普勒定律.....	(28)
3.1.4	卫星的受摄运动.....	(28)
第二节	GPS 卫星星历.....	(29)
3.2.1	广播星历.....	(30)
3.2.2	精密星历.....	(31)
第四章	GPS 在民用方面的进展.....	(33)
第一节	GPS 定位技术在地球动力学研究方面的应用.....	(33)
4.1.1	GPS 用于地球板块运动的监测.....	(33)
4.1.2	GPS 用于地震预报.....	(35)
第二节	GPS 定位技术在海洋测绘方面的应用.....	(36)
4.2.1	在海洋资源勘探方面的应用.....	(36)
4.2.2	在海洋大地测量方面的应用.....	(38)
第三节	GPS 定位技术在精密工程测量和工程变形监测 方面的应用.....	(39)
4.3.1	在精密工程测量中的应用.....	(39)
4.3.2	在工程变形监测方面的应用.....	(42)
第四节	GPS 定位技术在导航方面的应用.....	(44)
4.4.1	实时动态单点定位的导航系统.....	(45)
4.4.2	差分 GPS (DGPS) 导航系统.....	(46)
4.4.3	广域差分 GPS 导航系统.....	(48)
4.4.4	GPS 用于飞行器姿态测定.....	(50)
4.4.5	GPS/数据链用于改进机场地面控制.....	(51)
第五节	GPS 在汽车导航和城市交通管理中的应用.....	(51)
4.5.1	GPS 用于汽车导航.....	(51)
4.5.2	采用差分 GPS 和航位推算绘制道路图.....	(52)
第六节	"3S"技术的协调发展.....	(53)
4.6.1	GPS 用于遥感.....	(53)

4.6.2	GPS 在 GIS 中的应用.....	(54)
第七节	GPS 在农林等方面的应用.....	(55)
4.7.1	GPS 用于农业.....	(55)
4.7.2	GPS 用于森林防火.....	(56)
4.7.3	GPS 在自然淘汰评估以及考古中的应用.....	(56)
第八节	在其他方面运用 GPS 的几个实例.....	(57)
4.8.1	GPS 用于跟踪大象.....	(57)
4.8.2	采用 GPS 对电线杆进行测定.....	(57)
4.8.3	GPS 防止起重机撞毁.....	(58)
4.8.4	采用 GPS 在树丛中寻找矿井.....	(58)
4.8.5	美急救服务直升机使用 GPS 导航.....	(59)
第五章	G P S 在军事领域的应用.....	(61)
第一节	GPS 在航空武器中的应用.....	(61)
5.1.1	GPS 用于各类导弹制导.....	(61)
第二节	GPS 用于军用飞机导航.....	(69)
5.2.1	嵌入 GPS 的导航系统(EGI)广泛用于军机.....	(69)
5.2.2	GPS 在电子战中的应用.....	(70)
第三节	军用 GPS 技术及设备.....	(71)
第六章	G P S 在海湾战争中的应用.....	(74)
第一节	概述.....	(74)
第二节	在战前侦察和空军中的应用.....	(75)
第三节	GPS 用于地面部队.....	(79)
第四节	GPS 在战争中的使用效果.....	(82)

第一章 概论

全球定位系统(GPS)是随着现代科学技术的发展,将航天技术、计算机技术、卫星导航与测地技术、卫星通信技术相结合而发展和建立起来的新一代精密卫星定位技术。本章我们将主要介绍一下该系统的发展概况、系统的组成与特点以及美国政府对利用 GPS 的限制性政策等。

第一节 GPS定位技术的发展及特点

1.1.1 GPS的发展

1957年10月,世界上第一颗人造地球卫星的发射成功,标志着人类开始了利用航天技术的新纪元。40多年来,人造地球卫星技术在通信、气象、资源勘察、导航、遥感、大地测量、地球动力学、天文学以及军事科学等众多学科领域得到了极其广泛的应用,从而推动了科学技术的迅猛发展。

人造地球卫星的出现,首先引起了各国军事部门的高度重视,1958年底,美国海军武器实验室,就着手建立为美国军用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)。该系统中,卫星的轨道都通过极地,故也称“子午(Transit)卫星系统”。1960年4月美国第一颗子午导航卫星升空,开始了导航卫星的新时代。1964年该系统建成,随即在美国军方启用,虽然导航卫星的发射和使用为地球移动物体的导航提供了前所未有的手段,然而,在使用中也明显暴露出其弱点:导航卫星绕地球两极飞行,不能随时定位,而必须等卫星飞到头顶才能定位,并且一次定位需要10多分钟,这样长的定位时间,对于高速移动物体的定位显然是力不从心的。虽然美国“海军导航

定位系统”在导航技术的发展中具有划时代的意义，但是由于该系统卫星数目较少(5~6颗)、运行高度较低(平均约 1000 km)，从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均约 1.5 小时)，因而它无法提供连续的实时三维导航。

为了满足军事部门和民用部门对连续实时和三维导航的迫切要求，1973 年美国国防部便开始组织海陆空三军，共同研制新一代卫星导航系统的计划，这就是目前所称的“GPS”(Global Positioning System)，其原名为“导航星”(NAVSTAR)——“授时与时距导航系统/全球定位系统”(Navigation System Timing and Ranging/Global positioning System)。该系统是美国继阿波罗登月、航天飞机研制后，不惜花费 130 亿美元建设的第三项十分庞大的航天计划。

该计划分两个阶段，第一阶段持续到 1979 年，这一阶段进行方案论证并发射了 4 颗用作系统试验的卫星，以验证其是否能达到预定目标，第二阶段于 1979 年开始，这一阶段进行了全面研制和系统调试，取得了显著进展。1993 年初，洛克韦尔公司接受了一项价值 12 亿美元的合同，用于生产 28 颗 GPS 卫星，最初计划于 1986 年开始发射，后由于“挑战者”号航天飞机失事，该计划被推迟执行，卫星发射日程从 1989 年 2 月才重新开始。

1993 年 12 月 8 日，美国国防部长正式通知运输部，GPS 卫星星座已具有初始工作能力(IOC)，同时，国防部的定位/导航执行委员会公布了一个文件，规定了 SPS 信号标准。这意味着商业和民用用户从此可享受 GPS 提供的标准定位服务(SPS)，即 100 米的水平精度(至少 95%的时间内)，初始工作能力要求至少有 24 颗健康的 Block I(原型)和 Block II 卫星位于轨道上并发送信号。当 24 颗 Block 卫星投入运行时，该系统将达到“全工作能力”(FOC)。

目前 GPS 技术的应用已进入各个领域(陆地、海洋、航空、航天、测量等)；用于多种用途(航路导航、进场着陆、精密定位、精确定时、卫星定轨、灾害监测、资源调查、工程建设、市镇规划、海洋开发、交通管制)等；有多种机型(测地型、全站型、定时型、手持型、集成型、车载型、船载型、机载型、星载型、弹载型等)，出现了多种技术如：DGPS、LADGPS(局域差分 GPS)、WADGPS(广域差分 GPS)等。

1.1.2 GPS 的特点

从 1978 年发射第一颗 GPS 试验卫星以来，利用该系统进行定位的研究、开发和试验工作发展异常迅速。理论与实践表明，GPS 同其他导航系统相比，其主要特点如下：

a. 全球地面连续覆盖。由于 GPS 卫星数目较多，且分布合理，所以地球上任何地点，均可连续地同步观测至少 4 颗卫星。从而保障了全球、全天候连续的三维定位。

b. 功能多，精度高。GPS 可为各类用户连续地提供动态目标的三维位置、三维速度和时间信息。目前，利用不同测距码实时定位、测速与测时的精度，大体如表 1—1 所列。

GPS 实时定位、测速与测时精度 表 1—1

采用的测距码	P 码	C/A 码
单点定位 (m)	5~10	20~40
差分定位 (m)	1	3~5
测速 (m/s)	0.1	0.3
测时 (ns)	100	500

c. 实时定位。利用全球定位系统导航，可以实时地确定运动目标的三维位置和速度，由此既可保障运动载体沿预定航线的运行，也可实时的监视和修正航行路线以及选择最佳的航线。

d. 应用广泛。随着 GPS 技术的发展，其应用的领域在不断拓宽。目前，在导航方面，它不仅广泛的用于海上、空中和陆地目标的导航，而且，在运动目标的监控与管理以及运动目标的报警与救援等方面，也已获得了成功的应用；在测量工作方面，这一定位技术在大地测量、工程测量、工程与地型变形监测、地籍测量、航空摄影测量和海洋测绘等各个领域的应用已甚为普遍。

考虑到 GPS 主要是为满足军事部门高精度导航的需要而建立的，所

以上述优点对军事上动态目标的导航，具有十分重要的意义。正因为如此，美国政府把发展 GPS 技术作为导航技术现代化的重要标志，并把这一技术视为 20 世纪最重大的科技成就之一。

第二节 GPS 的组成概况

1.2.1 GPS 空间星座部分

1. GPS 卫星星座的构成

全球定位系统的空间卫星星座，由 24 颗卫星组成，其中包括 3 颗备份卫星。卫星分布在 6 个轨道内，每个轨道上分布有 4 颗卫星。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角约为 55 度，各轨道平面升交点的赤经相差 60 度，在相邻轨道上，卫星的升交距角相差 30 度。轨道平均高度约为 20200 km，卫星运行周期为 11 小时 58 分。因此，同一观测站，每天出现的卫星图形

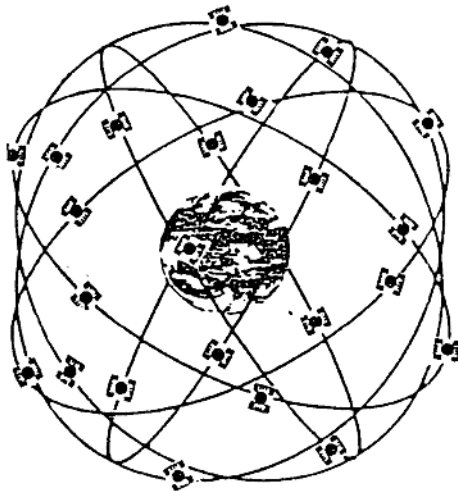


图 1—1 GPS 卫星星座

相同，只是每天提前约 4 分钟。每颗卫星每天约有 5 小时在地平线上，同时位于地平线以上的卫星数目，随时间和地点而异，最少为 4 颗，最多可达 11 颗。

目前，全球卫星定位系统的工作卫星在空间的分布情况如图 1—1 所示。

GPS 卫星在空间的上述配置，保障了地球上任何地点、任何时刻均至少可以同时观测到 4 颗卫星，加之卫星信号的传播和接收不受天气的影响，因此，GPS 是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。不过也应指出，GPS 卫星的上述分布，在个别地区仍可能在某一段时间内（例如数分钟），只能观测到 4 颗图形结构较差的卫星，而无法达到必要的定位精度。

空间部分的 3 颗备份卫星，可在必要的时候根据指令代替发生故障的卫星，这对于保障 GPS 空间部分正常而高效的工作是极其重要的。

迄今，GPS 卫星已设计了三代，分别为 Block I、Block II 和 Block III（见表 1—2）。第一代（Block I）卫星，用于全球定位系统的试验，通常称为 GPS 实验卫星。这一代卫星共研制和发射了 11 颗，卫星的实际寿命为 5 年，卫星分布在两个轨道内，轨道倾角约为 63° ，现已停止工作。第二代（Block II，IIA）卫星用于组成如图 1—1 所示的 GPS 工作卫星星座，通常称为 GPS 工作卫星。第二代卫星共研制了 28 颗，卫星实际寿命为 7.5 年，从 1989 年初开始，至 1994 年上半年已发射完毕。第三代（Block III，IIR）卫星尚在设计中，预计于 90 年代末发射，以取代第二代卫星，改善全球定位系统。

GPS 卫星概况

表 1—2

GPS 卫星	区 分	数 量 (颗)	发射时间	用 途
第一代	Block I	11	1978~1985	系统实验
第二代	Block II, IIA	28	1988~1994	正式工作
第三代	Block III, IIR	20	90 年代末	改善 GPS

现将至 1994 年 10 月投入运行的 GPS 卫星状况, 列入表 1—3, 以作参考。

可观测的 GPS 卫星状况(至 1994.10)

表 1—3

SVN 编号 PRN 编号	轨道 平面	频率 标准	发射 时间	启用 时间
Block II:				
14 14	E-1	Cs	1989.02.14	1989.04.15
13 2	B-3	Cs	1989.06.10	1989.08.10
16 16	E-3	Cs	1989.08.18	1989.10.14
19 19	A- 4	Cs	1989.10.21	1989.11.23
17 17	D-3	Cs	1989.12.11	1990.01.06
18 18	F-3	Cs	1990.01.24	1990.02.14
20 20	B-2	Rb	1990.03.26	1990.04.18
21 21	E-2	Cs	1990.08.02	1990.08.22
15 15	D-2	Cs	1990.10.01	1990.10.15
Block II A:				
23 23				
24 24				
25 25	E-4	Cs	1990.11.26	1990.12.10
28 28	D-1	Cs	1991.04.07	1991.08.30
26 26	A- 2	Cs	1992.02.23	1992.03.24
27 27	C-2	Cs	1992.04.10	1992.04.25
32 1	F-2	Cs	1992.07.07	1992.07.23
29 29	A- 3	Cs	1992.09.09	1992.09.30
22 22	F-1	Cs	1992.11.22	1992.12.11
31 31	F-4	Cs	1992.12.18	1993.01.05
37 7	B- 1	Cs	1993.02.03	1993.04.04
39 9	C- 3	Cs	1993.03.30	1993.04.13
35 5	C-4	Cs	1993.05.13	1993.06.12
34 4	A- 1	Cs	1993.06.26	1993.07.20
36 6	B- 4	Cs	1993.08.30	1993.09.28
	D-4	Cs	1993.10.26	1993.11.22
	C-1	Rb	1994.03.10	1994.03.28

注:1. SVN 编号:空间飞行器编号(SVN-Space Vehicle Number);

2. PRN 编号:按卫星采用的伪随机噪声码编号 (PRN-Pseudo Random Noise Code);

3. 频率标准: Rb-Rubidium (铷);Cs-Cesium(铯);

4. SVN 35 和 36 设有星载激光反射器。

2. GPS 卫星及其功能

GPS 卫星的主体呈圆柱形, 直径约为 1.5 m, 重约 774 kg(包括 310 kg 燃料), 两侧设有两块双叶太阳能板, 能自动对日定向, 以保障卫星正常工作用电(见图 1—2)。

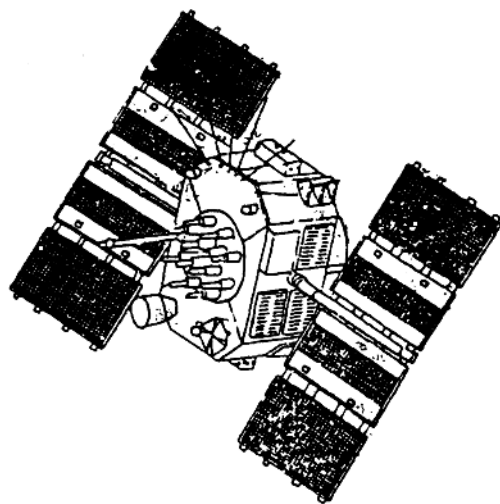


图 1—2 GPS 卫星构造示意图

每颗卫星装有 4 台高精度原子钟(两台铷钟和两台铯钟), 这是卫星的核心设备。它将发射标准频率信号, 为 GPS 定位提供高精度的时间标准。

GPS 卫星的基本功能是:

●接收和储存由地面监控站发来的导航信息, 接受并执行监控站的控制指令;

●卫星上设有微处理机, 进行部分必要的数据处理工作;

●通过星载的高精度的铯钟和铷钟提供精密的时间标准;

●向用户发送定位信息;

●在地面控制站的指令下, 通过推进器调整卫星的姿态和启用备用卫星。

1.2.2 地面监控部分

GPS 的地面监控部分, 目前主要由分布在全球的 5 个地面站所组成, 其中包括卫星监测站、主控站和信息注入站。其分布如图 1—3 所示。

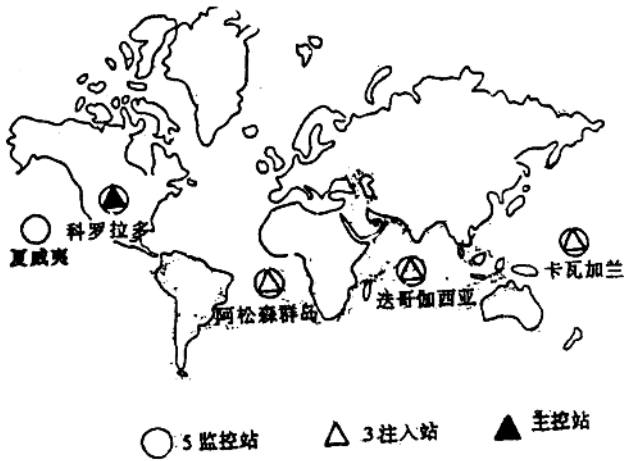


图 1—3 GPS 地面监控站的分布

1. 监控站

现有 5 个地面站均具有监控站的功能。

监控站是在主控站直接控制下的数据自动采集中心。站内设有双频 GPS 接收机、高精度原子钟、计算机各一台和若干台环境数据传感器。接收机对 GPS 卫星进行连续观测，以采集数据和检测卫星的工作状况。原子钟提供时间标准，而环境传感器收集有关当地的气象数据。所有观测资料由计算机进行初步处理，并存储和传送到主控站，用于确定卫星的轨道。

2. 主控站

主控站一个，设在科罗拉多（Colorado Spring）。主控站除协调和管理所有地面监控系统的工作外，其主要任务是：

- 根据本站和其他监测站的所有观测资料，推算编制各卫星的星历、卫星钟差和大气层的修正参数等，并把这些数据传送到注入站。

- 提供全球定位系统的时间基准。各监测站和 GPS 卫星的原子钟，均应与主控站的原子钟同步，或测出其间的钟差，并把这些钟差信息编入导航电文，送到注入站。

- 调整偏离轨道的卫星，使之沿预定的轨道运行。启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

3. 注入站

注入站现有 3 个，分别设在印度洋的迭哥伽西亚（Diego Garcia）、南大西洋的阿松森群岛（Ascencion）和南太平洋的卡瓦加兰（Kwajalein）。注入站的主要设备包括一台直径为 3.6 m 的天线、一台 C 波段发射机和一台计算机。其主要任务是在主控站的控制下，将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文和其他控制指令等，注入到相应卫星的存储系统，并监测注入信息的正确性。

整个 GPS 的地面监控部分，除主控站外均无人值守。各站间用现代化的通信网络联系起来，在原子钟和计算机的驱动和精确控制下，各项工作实现了高度的自动化和标准化。

1.2.3 用户设备部分

全球定位系统的空间部分和地面监控部分，是用户应用该系统进行定位的基础，而用户只有通过用户设备，才能实现应用GPS定位的目的。

用户设备的主要任务是，接收GPS卫星发射的无线电信号，以获得必要的定位信息及观测量，并经数据处理而完成定位工作。

根据GPS用户的不同要求，所需的接收设备各异。随着GPS定位技术的迅速发展和应用领域的日益扩大，许多国家都在积极研制、开发适用于不同要求的GPS接收机及相应的数据处理软件。

用户设备，主要由GPS接收机硬件和数据处理软件，以及微处理机及其终端设备组成，而GPS接收机的硬件，一般包括主机、天线和电源。

目前，国际上适于测量工作的GPS接收机，已有众多产品问世，且产品的更新很快，日新月异。在我国，各种型号的接收机已应用于各个不同的领域。

第三节 美国政府对GPS用户的限制性政策

与用户的措施

1.3.1 当前美国对GPS用户的主要限制性政策

因为GPS定位技术与美国的国防现代化发展密切相关，所以，为了保障美国的利益与安全，限制非经美国特许的用户利用GPS定位的精度，该系统除在设计方面采取了许多保密性措施外，在系统运行中，还采取了或可能采取其他一些措施来限制用户获取GPS观测量的精度。这些措施目前主要包括：

- 对不同的GPS用户，提供不同的服务方式；
- 实施选择可用性(Selective Availability—SA)政策；
- 精测距码(P码)的加密措施(Anti-Spoofing—A-S)。

1. 对不同的GPS用户提供不同的服务方式

GPS卫星发射的无线电信号，含有两种精度不同的测距码，即所谓P码(也称精码)和C/A码(也称粗码)。相应两种测距码，GPS

提供了两种定位服务方式，即精密定位服务（Precise Positioning Service-PPS）和标准定位服务（Standard Positioning Service-SPS）。

精密定位服务（PPS），可提供 L_1 和 L_2 载波上的P码， L_1 载波上的C/A码，导航电文和消除SA影响的密钥。PPS的主要对象是美国军事部门和其他经美国特许的用户。这类用户，可利用P码获得精度较高的观测量，且能通过卫星发射的两种频率信号量测距离，以消除电离层折射的影响。利用PPS单点实时定位的精度可达 $5\text{m}\sim 10\text{m}$ 。但是，P码是不公开的保密码，非经美国政府特许的广大用户难以利用。

标准定位服务（SPS），仅提供 L_1 载波上的C/A码和导航电文，其主要服务对象是非经美国政府特许的广大用户。这类用户只能利用C/A码获得精度较低的观测量，且只能采用调制在一种载波上的C/A码测量距离，无法利用双频技术消除电离层折射的影响。其单点实时定位的精度，约为 $20\text{m}\sim 40\text{m}$ 。

2. 实施选择可用性（SA）政策

为了进一步降低标准定位服务（SPS）的定位精度，以保障美国政府的利益与安全，对GPS工作卫星发播的信号，实行了SA政策，以进行人为的干扰。这种干扰，目前是通过所谓 ϵ （epsilon）和 δ （delta）两种技术实现的。

ϵ 技术是干扰卫星星历数据，通过降低GPS卫星播发的轨道参数的精度，来降低利用C/A码进行实时单点定位的精度； δ 技术是对GPS的基准信号人为的引入一个高频抖动信号，以降低C/A码伪距观测量的精度。

目前，在SA的影响下，利用SPS的实时单点定位精度降为约 100m （水平）和 150m （垂直）。而且，这种影响是可变的，在必要时，美国政府将可能进一步降低利用SPS的定位精度。

SA是针对非经美国政府特许的广大GPS用户，采取的降低实时定位精度的措施，而对能够利用精密定位服务（PPS）的用户，则可以利用密钥自动地消除SA的影响。

3. 精测距码的加密（A-S）措施

P码的加密措施，也叫“反电子欺骗”（A-S）措施。当P码已被解密，或在战时，对方如果知道了特许用户接收机所接受卫星信号的频率和相