

Basis, Communication Protocol and Applications of GPS

Gong Jianwei (2001.01.25)

Attention: This PDF file is written in Chinese, so Acrobat Reader with Chinese character library is necessary.

Abstract: This paper summaries the basis and construction of Global Positioning System (GPS), The emphasis is communication protocol of GPS.

GPS 的基本原理、通讯码制及定位应用

摘要：本作业概述了 GPS 全球定位系统的基本原理、系统组成，着重介绍了通讯码制（C/A 码和 P 码），然后介绍了 GPS 定位系统在本人正在进行的课题—陆地自主车和半自主遥控导弹靶车两个系统中的应用，并给出一个 GPS 信号接收和处理的 C 源程序。

目次

- 1 全球定位系统的原理及组成
 - 1.1 GPS 基本原理
 - 1.2 GPS 的组成
- 2 有关 GPS 工作的几个问题
 - 2.1 信号与多通道
 - 2.2 差分工作方式与独立工作方式
 - 2.3 载波相位与码相位
 - 2.4 操作码
 - 2.5 系统精度
- 3 GPS 信号结构
 - 3.1 GPS 传输信号分类
 - 3.2 GPS 信号结构
 - 3.3 C/A 码

3.4 P 码

4 GPS 在陆地自主车和半自主遥控靶车定位上的应用

4.1 GPS 在陆地自主车项目中的应用

4.2 GPS 在制导导弹遥控靶车上的应用

4.3 Garmin GPS 接收机通讯格式及其接收程序

1 全球定位系统的原理及组成

1.1 基本原理

GPS 系统是由美国国防部的陆海空三军在 70 年代联合研制的新型卫星导航系统，它的英文名称是“Navigation Satellite Timing And Ranging / Global Positioning System”，其意为“卫星测时测距导航 / 全球定位系统”，简称 GPS 系统。该系统是以卫星为基础的无线电导航定位系统，具有全能性(陆地、海洋、航空和航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和定时的功能。能为各类用户提供精密的三维坐标、速度和时间。

GPS 的定位原理实质上就是测量学的空间测距定位，利用在平均 20200km 高空均匀分布在 6 个轨道上的 24 颗卫星，发射测距信号码和载波，用户通过接收机接收这些信号测量卫星至接收机之距，通过一系列方程演算，便可知地面点位坐标。

1.2 GPS 的组成

GPS 由三部分组成：GPS 空间部分、地基监控站和 GPS 用户接收机部分。



图1.1 GPS系统结构

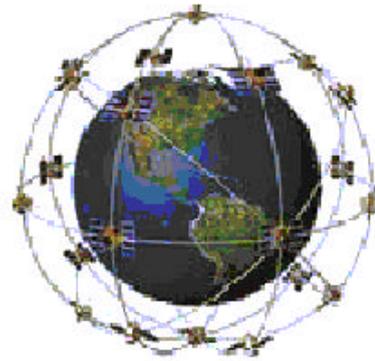


图1.2 GPS卫星空间分布示意图

1.2.1 GPS 空间部分

GPS 空间部分由 24 颗分布在 6 个等间隔轨道上的卫星组成。卫星分布可保证全球任何地区、任何时刻都不少于 4 颗卫星供观测。24 颗卫星中 3 颗做为备份。每个轨道平面上有 4 颗卫星，它们按与地球成 55° 的相同方向运行，空间间隔约为 90° 。这些卫星工作在 2 种频率下：1575.42MHz 和 1227.6MHz，通过测量这些卫星到达的时间，用户可以用 4 颗卫星确定 4 个导航参数：纬度、经度、高度和时间。

每个 GPS 卫星都对应一组编号，它们有多种编号，一般采用 PRN（卫星所采用的伪随机噪声码）编号。GPS 定位精度高低关键在于高稳定度的频率标准，为此，每颗 GPS 卫星都设有两台铷原子钟和两台铯原子钟。

1.2.2 地基监控站地基部分

地基监控站由一个主控站和四个监察院控站组成。主控站设置在美国大陆，四个监控站分别设在大西洋、太平洋和印度洋诉岛屿上

用户接收机部分

1.2.3 GPS 用户接收机

用户接收机通过接收多颗卫星的信号来解算出自身的位置，以实现定位和导航。GPS 接收机按使用环境可分为中、低动态接收机和高动态接收机；按所收信号可分为单频 C/A 码接收机和双频 P 码和 Y 码接收机。

GPS 接收机可以捕获到按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号，并跟踪这些卫星的运行，对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理，以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间，解译出 GPS 卫星所发送的导航电文，实时地计算出测站的三维位置，甚至三维速度和时间。

2 有关 GPS 工作的几个问题

2.1 信号与多通道

为了获得位置坐标，用户必须从 4 颗卫星获得信号，这可以通过几种不同的方法来实现。

- 单通道接收机，按顺序接收 4 颗卫星的信号，这种定序可以以 $1/4-1$ 秒的速率进行，从而使用户大约每 5 秒钟就可以获得一次定位信息。这种定位系统成本最低。
- 多通道接收机（以 5 通道为例），5 通道接收机可以通过 4 个通道锁住 4 颗卫星的信号，第 5 个通道用于获取低频导航数据，这种方法得到了最高的信噪比，因为任一给定的卫星信号都将被连续而不是在 $1/4$ 个工作周期内被接收。

2.2 差分工作方式与独立工作方式

差分工作方式需要两台接收机，第一台接收机（即基准差分台）

的位置准确已知，第二台通过第一台接收机的位置来修正自己的位置。通过计算测量距离与真实距离的误差，基准差分台能够计算出卫星数据中由电离层误差和星历表误差所产生的影响，将此信息传送到用户接收机时，便能修正此误差，从而得到更精确的定位。

2.3 载波相位与码相位

码接收机是通过码相位来测量用户和卫星的伪距的，由于 C/A 码片对应空间距离为 293 米，相位检测精度能达到 1%，所以能得到均方误差为 3 米的精度。若测量波长为 20 厘米的载波相位，同样 1% 的测量精度，却能够产生相当于 1 毫米的精度（此时接收机更为复杂），同时，为解决整数波长的多值性问题，校准时间也比较长。

2.4 操作码

普通操作码需要 4 颗卫星，另外还有几种方式，第一种方式叫做“视野最优”操作码，用这种码接收时能自动确定进入视野的卫星中哪 4 颗卫星具有最好的导航定位几何分布；第二种码是“全视野码”，用此码接收时，从视野中所有卫星来的信号会被同时处理，系统精度会提高 20%，第三种码是高度—辅助码，适于机载应用。这些码应用时可相互转换。

2.5 系统精度

GPS 提供 2 种水平的导航服务—精密定位服务 PPS 和标准定位服务 SPS。PPS 主要供美国及其盟国的军用和特殊许可部门，对一般用户只能使用单频 C/A 码定位，由于美国的 GPS 政策所定，使用单频 C/A 码还要受到 SA 的影响（即为降低精度而人为加入的一些干

扰), 因此一般单机定位精度为二维 100 米左右, 对要求高的场合则需采用 DGPS 差分工作方式(精度可提高到 10 米, 军用可到毫米级)。

3 GPS 信号结构

3.1 GPS 传输信号分类

被传输的信号包含四种不同的信息。

- 第一种是频率为 10.23MHz 的军用 P 码, 美国政府禁止把该码提供给民用用户。P 码接收机价格昂贵, 但有三个优点: (1) 它能利用另一个 L 波段通道 (1227.6MHz), 补偿电离层折射误差, 因为信号通过电离层折射变慢, 且这种变化是大气环境及时间的函数, 若知道两个频率的延迟时间, 就能对电离层折射引起的误差进行修正; (2) 码速高, 将使精度提高 2 倍左右; (3) 在噪声环境中仍有良好性能 (适于军用)。

- 第二种是 C/A 码 (频率为 1.023MHz), 用户用该码可以得到基本的定位信息。

- 第三种信息是一种调制在同一载波上的 50 位/秒的低频数据信号, 利用此信息用户可以计算出当卫星发射用于测量距离的信号时卫星所在的位置, 每颗卫星约每小时必须对该信息更新一次, 获取此信息需要 30 秒到 40 秒的时间。

- 最后是载波相位信息, 可以用来进行精确的大地测量和其它测量应用, 利用载波频率还可以获得精确的速度信息。

3.2 GPS 信号结构

GPS 卫星向广大用户发送的导航电文是一种不归零的二进制数

据码 $D(t)$ ，码率 $f_d=50\text{Hz}$ 。为了节省卫星的电能、增强 GPS 信号的抗干扰性、保密性，实现遥远的卫星通讯，GPS 卫星采用伪噪声码对 D 码作二级调制，即先将 D 码调制成伪噪声码（ P 码和 C/A 码），再将上述两噪声码调制在 L_1 、 L_2 两载波上，形成向用户发射的 GPS 射电信号。因此，GPS 信号包括两种载波（ L_1 、 L_2 ）和两种伪噪声码（ P 码、 C/A 码）。这四种 GPS 信号的频率皆源于 10.23MHz （星载原子钟的基频）的基准频率。基准频率与各信号频率之间存在一定的比例。其中， P 码为精确码，美国为了自身的利益，只供美国军方、政府机关以及得到美国政府批准的民用用户使用， C/A 码为粗码，其定位和时间精度均低于 P 码，目前，全世界的民用客户均可不受限制地免费使用。

GPS 卫星信号包括三种信号分量：载波、测距码和数据码。时钟频率 $f_0=10.23\text{MHz}$ ，利用频率综合器产生所需要的频率。GPS 信号的产生过程如图 2.1 所示。

GPS 使用 L 波段，配有两种载波：

载波 L_1 : $f_{L1}=154f_0=1545.42\text{MHz}$ ，波长为 19.03cm ；载波 L_2 : $f_{L2}=120f_0=1545.60\text{MHz}$ ，波长为 24.42cm ；两载波之间频率差为 347.82MHz ，等于 L_2 的 28.3% ，选择这两个载波，目的在于测量出或消除由于电离层效应而引起的延迟误差。

数据流和两种伪随机码分别以同相和正交方式调制在 L_1 载波上，其完整的信号结构为：

$$S_{L1}(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_{L1} t + \mathbf{j}_1) + A_c C_i(t) \sin(\omega_{L1} t + \mathbf{j}_1)$$

在 L_2 载波上，只用 P 码进行双相调制，其信号结构为：

$$S_{L_2}(t) = B_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_{L_2} t + j_2)$$

式中， A_p, B_p, A_c 分别为 P 码和 C/A 码的振幅； $P_i(t), C_i(t)$ 分别为精测距码 (P 码) 和粗测距码 (C/A 码)； $D_i(t)$ 为卫星电文的数据流； $\omega_{L_1}, \omega_{L_2}$ 分别为载波 L_1 和 L_2 的角频率； j_1, j_2 分别为信号的起始相位。

根据这一原理，GPS 工作所需的信号按图 2.2 的方案进行合成，然后向全球发射，形成现在随时随地都能接收到的信号。对用户而言，最感兴趣的是测距码的数据流（导航电文）。下面分别介绍测距码和特征和结构。

3.3 C/A 码

C/A 码是用于跟踪、锁定和测量的伪随机码。它是由 m 序列优选对组合码形成的 Gold 码 (G 码)。G 码是由两个长度相等而互相关极大值最小的 m 序列码逐位进行模 2 相加构成的。改变产生它的两个 m 序列的相对相位，就可以得到不同的码。对于长度为 $N=2^n-1$ 的 m 序列，每两个码可以产生 N 个 G 码。G 码最主要的优点在于广泛用于多址通信。这是 GPS 采用 G 码作为 C/A 码的主要原因。

C/A 码是两个 10 级反馈移位寄存器构成的 G 码产生的。两个移位寄存器于每星期日子夜零时，在置“1”脉冲作用下全处于 1 状态，同时在码率 1.023MHz 驱动下，两个移位寄存器分别产生码长为 $N=2^{10}-1=1023$ ，周期为 1ms 的两个 m 序列，然后与 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 。其中 $G_2(t)$ 序列经过相位选择器，输入一个与 $G_2(t)$ 平移等价的 m 序列，然后与 $G_1(t)$ 模 2 相加，便得到 C/A 码。即

$$C/A(t) = G_1(t) \cdot G_2(t + it_0)$$

采用不同的 it_0 值，可以产生 1023 个 $G_2(t)$ ，再加上 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 本身，一共可以产生 1025 个结构不同的 C/A 码，提供选用。这些 C/A 码具有相同的码长 $N_u = 2^{10} - 1 = 1023 \text{ bit}$ ，相同的码元宽 $t_u = 1/f_1 = 0.98 \mu \text{ s}$ ，相当于 293.1m，以及相同的周期 $T_u = N t_u = 1 \text{ ms}$ 。

从这些 $G(t)$ 码中选择 32 个码以 PRN1, ..., PRN32 命名各个 GPS 卫星。由于 C/A 码长很短，可在 1s 时间内搜索 1000 次，所以 C/A 码除了用于捕获卫星信号外，还可以过渡到捕获 P 码。

C/A 码的码元宽度较大。若两个序列的码元测量误差为码宽的 1/10、1/20、...、1/100，此时相应的测距误差为 29.3-2.93m。现在导航接收机的伪距测量分辨率可达到 0.1m。

3.4 P 码

P 码是 GPS 的精测码，码率为 10.23MHz。它是由两个伪随机码 $PN_1(t)$ 和 $PN_2(t)$ 相乘而成。

$PN_1(t)$ 是由两级 12 位移位寄存器构成的。两个移位寄存器分别采用反馈点八进制编码 14501 和 17147 形成周期为 1.5s 的 m 序列 $PN_1(t)$ 。一周期的码位数为： $N_1 = 10.23 \times 10^6 \times 1.5 = 15.345 \times 10^6$ 位。

$PN_2(t)$ 是由另两级 12 位移位寄存器构成的。两个移位寄存器分别采用反馈点八进制编码 17673 和 11435 形成两个 m 序列。码率与 $PN_1(t)$ 相同，但码位比 $PN_1(t)$ 多 37 个码元，即码长 $N_2 = 15.345 \times 10^6 + 37$ 。

$$\text{因此 P 码为 } P(t) = PN_1(t) PN_2(t + n_i \pi) \quad 0 \leq n_i \leq 36$$

$$\text{相应的码元数为: } N = N_1 N_2 = 2.35 \times 10^{14}$$

相应的周期数为: $T_p = N/f_p = 267$ 天, (若 38 周)

在 $P(t)$ 中, n_i 可取 $0, 1, 2, \dots, 36$ 。这样可得到 37 种 P 码。在实际应用中, P 码采用 7 天的周期, 即规定码 $P(t) = PN_1(t) PN_2(t + n_i \pi)$ 在每星期六午夜零时置全“1”状态作为起始点, 然后从中截取一段周期为 7 天的码, 作为 P 码, 一共取得 37 个 P 码, 32 个供 GPS 卫星使用, 5 个供地面监测站使用。这样保证 GPS 正常工作的唯一性。

因为 P 码的码长为 6.19×10^{12} , 所以在不知道 P 码结构的情况下, 是无法捕获 P 码。由于在试验期间, 某些厂家已经掌握捕获 P 码的技术, 生产出 P 码接收机, 因此, 美国国防部又实行了 AS 政策, 即在 P 码上又增加了极度保密的 W 码, 且绝对禁止非特许用户使用。

P 码的码元宽度为 $0.098 \mu s$, 相当于 29.3m。若两个序列的码元测量误差为码宽的 $1/10$ 、 $1/20$ 、 \dots 、 $1/100$, 此时相应的测距误差为 $2.93 - 0.293m$, 为 C/A 码测距误差的 $1/10$ 。故称 C/A 码为粗测码, P 码为精测码。

4 GPS 在陆地自主车和半自主遥控靶车定位上的应用

GPS 系统具有定位精度高、全天候、实时性、测站无须通视、使用方便等优点, 并且所有成果均通过数据来实现, 便于数字化管理, 所以 GPS 已被广泛用于社会生活的各个领域, 如工程、交通、气象、国防、水利、环报、安全保卫、定时等。我国从 80 年代起开始引进 GPS 接收机极其技术, 目前, GPS 也在我国得到了全面广泛地应用。下面简要介绍 GPS 定位系统在陆地自主车和半自主遥控靶车项目中应用。

4.1 GPS 在陆地自主车项目中的应用

移动式机器人是一种能够在各种环境中自主或半自主移动的智能机器人，在路径跟踪控制过程中，路径点的获取就是由 GPS 定位系统提供的，由于跟踪精度较高，采用差分 GPS 接收方法，精度可达到 0.5m。在实验期间体会最深的是，我国在定位技术上受制于人。由于当时正值我军在北京附近进行大型军事演习，情报部门告知 GPS 信号被故意干扰，结果我们实验无法正常进行。

4.2 GPS 在制导导弹遥控靶车上的应用

遥控靶车是半自主机器人，GPS 定位系统的作用是在遥控状态或遥控示教再现状态下保证靶车不超过预定的边界。因此其精度可以很低，采用单接收机。

4.3 Garmin GPS 接收机通讯格式及其接收程序

在遥控靶车上采用了 Garmin GPS 接收机，用 NEMA 无线通讯码，为字符型：

```
“ $GPGGA,XX,XXX,XXXX,XX*hh<CR><LF>”
```

接收到经度和纬度等信息，再经过相应的换算，就可得到相对位置，从而可以控制靶车不超出预定边界。

参考文献

1. 李洪涛等，GPS 应用程序设计。科学出版社，1999。
2. 北京丰创 GPS 信息网，《GPS 讲座》。
3. 龚建伟等，轮式移动机器人控制方法研究，科技报告。

