

第三章 GPS信号结构与接收机原理

基本要求:

了解**GPS**信号的分类、组成和结构、导航电文的内容，学习伪随机码的概念以及**C/A**、**P**码的区别，掌握载波信号与导航电文的调制技术的基本原理。最后，通过对不同功能、不同类型接收机的认识，了解**GPS**接收机的基本组成和工作过程。



提 纲

3.1 信号结构与调制技术

3.2 导航电文

3.3 伪随机码测距

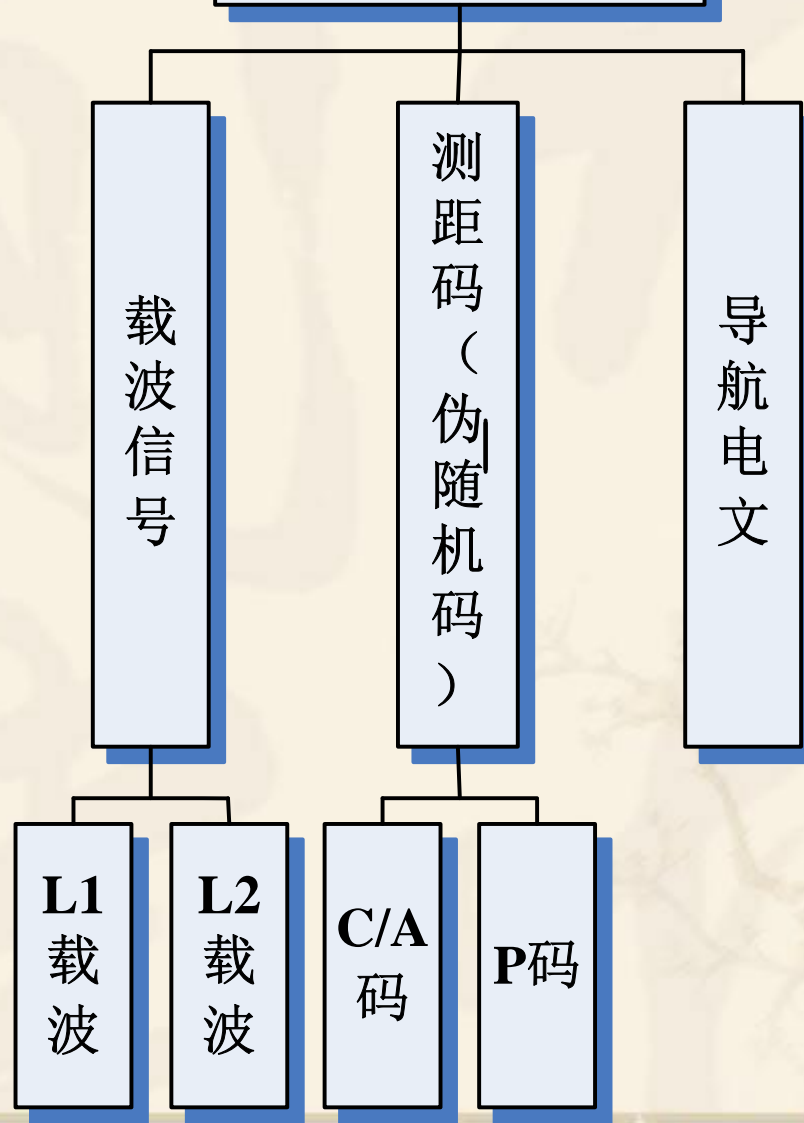
3.4 GPS接收机的工作过程

3.1 信号结构与调制技术

❖ 3.1.1 信号成分

在**GPS**系统中将信息变成编码脉冲以数字通信方式来完成。考虑到保密通信和提高抗干扰能力，各卫星反射信号的区分选择及精密测距，将编码脉冲先调制到伪随机码上，即经伪随机码扩频，再对**L**波段的载频进行双相调制（或称为移相键控调制**BPSK**），然后由卫星天线发射。

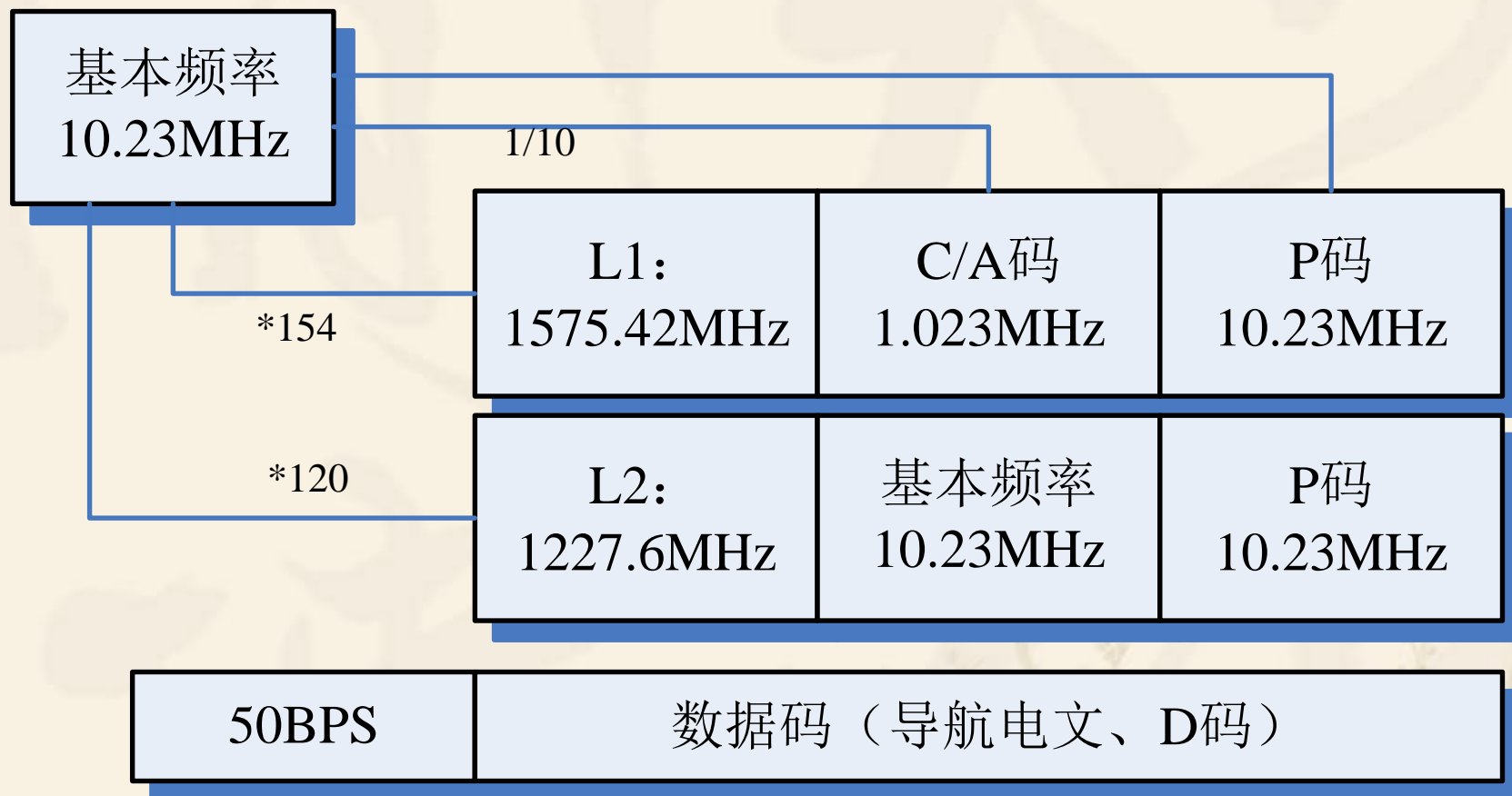
GPS卫星信号



GPS卫星信号成分

信号成分	频 率
基准频率 /MHz	$f_0=10.23$
L_1 载波 f_1 /MHz	$154f_0=1575.42$ (波长约为19.0cm)
L_2 载波 f_2 /MHz	$120f_0=1227.6$ (波长约为24.4cm)
P码（精码）	$f=10.23\text{Mb/s}$
C/A码（粗/获码）	$f=1.023\text{Mb/s}$
导航电文	$f=50*10^{-6}\text{Mb/s}$ 或是50b/s

信号的组成关系



信号的合成准则

❖ 测距码与导航电文的合成

模2相加:

$$0 \oplus 0 = 0$$

$$0 \oplus 1 = 1$$

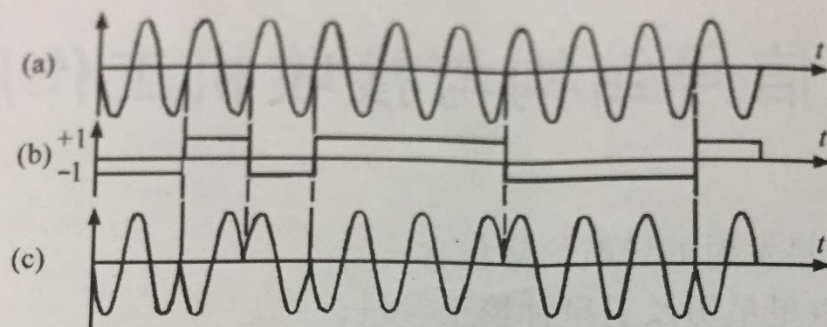
$$1 \oplus 1 = 0$$

信号的合成准则

二进制数据与载波的合成

采用双向移项键控调制技术

采用双向移项键控调制技术



(a) 载波；(b) 码；(c) 调制载波

图 3-1 双相调制

表 3-1 总结了信号各个成分和它们的频率。

表 3-1 GPS 卫星信号成分

信号成分	频 率
基准频率/MHz	$f_0 = 10.23$
f_1 /MHz	$154f_0 = 1\,575.42$ (波长约为 19.0 cm)
f_2 /MHz	$120f_0 = 1\,227.6$ (波长约为 24.4 cm)
P 码 (精码)	$f_0 = 10.23$ Mbit/s
C/A 码 (粗获码)	$f_0/10 = 1.023$ Mbit/s
导航电文	$f_0/204\,600 = 50 \times 10^{-6}$ Mbit/s 或 50 bit/s

L1 CARRIER 1575.42 MHz



C/A CODE 1.023MHz



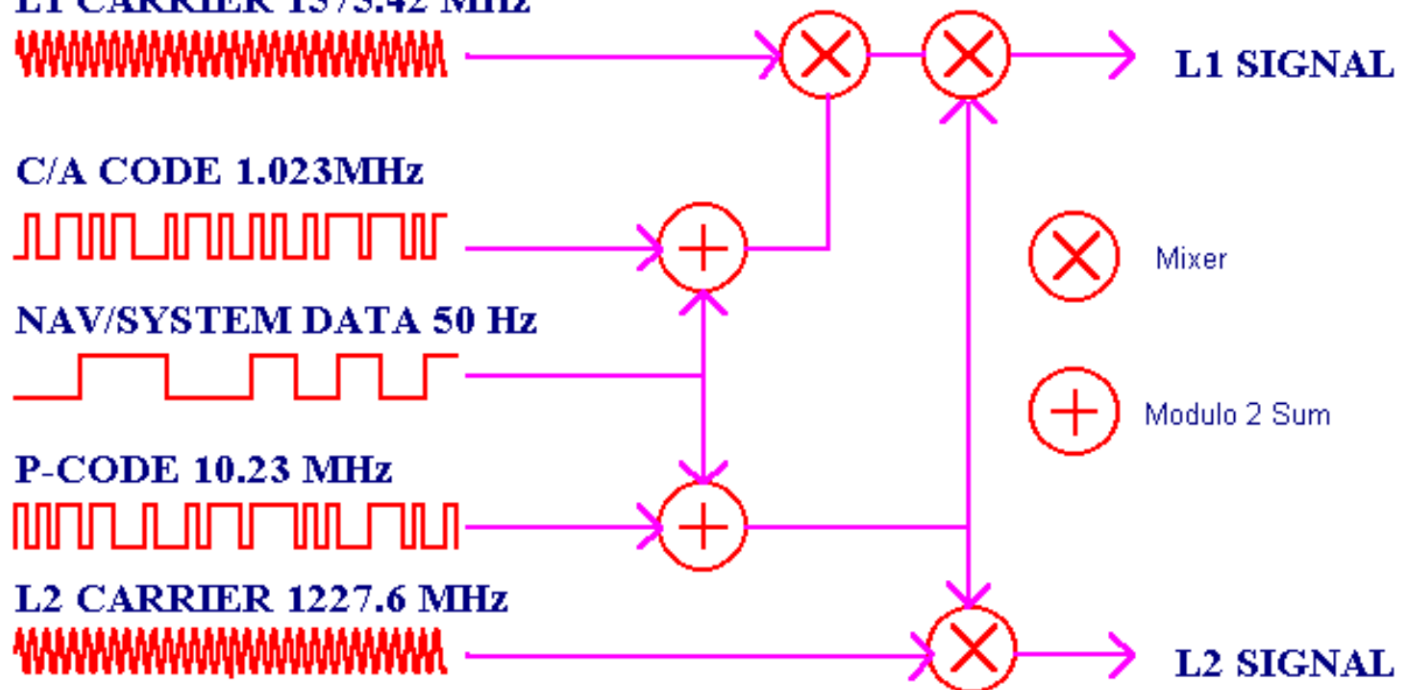
NAV/SYSTEM DATA 50 Hz



P-CODE 10.23 MHz



L2 CARRIER 1227.6 MHz



GPS SATELLITE SIGNALS

❖ 3.1.2 信号调制

带有导航信息的编码脉冲先调制到伪码（**P码**和**C/A码**）上，然后对**L**波段的载频和进行双向调制（**BPSK**）。在**L2**载波上只调制了一种伪码（**P码**），而在**L1**载波上调制了两种伪码，**P码**和**C/A码**，而且是采用正交调制方式进行的，以便分别对**P码**和**C/A码**解调。由于对载波信号采用了**BPSK**调制技术，使其频带变宽，对应**P码**和**C/A码**的频带宽度分别为**10.23 MHz**和**1.023 MHz**。

- ❖ 将调制到伪码上，即将二者模2相加，或波形相乘，乘积码为。编码脉冲的频带被扩展，称之为扩频。频谱展宽后，使单位频带内信号功率下降，从而减小了信号被检测和被窃听的可能性。另一方面，要将扩频信号恢复成编码脉冲信号，即解扩，必须在接收机中设置同样结构的伪码作跟踪伪码。
- ❖ 由于卫星发射的输出功率分配在较宽的频带上，当GPS接收机接收到折中宽谱信号时，信号的功率低于噪声，但当卫星信号与接收机内部产生的C/A码或P码（跟踪伪码）相乘时（相关处理），信号功率又再次集中到狭窄的频带上，并且高于噪声。

- ❖ **P码**调制在**L1**和**L2**载波上，而**C/A**码仅调制在**L1**载波上且与**P**码相位相差**90度**。**GPS**卫星发射的信号为

$$L_1(t) = A_c C(t) D(t) \sin(2\pi f_1 t + \varphi_c) + A_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{p1})$$

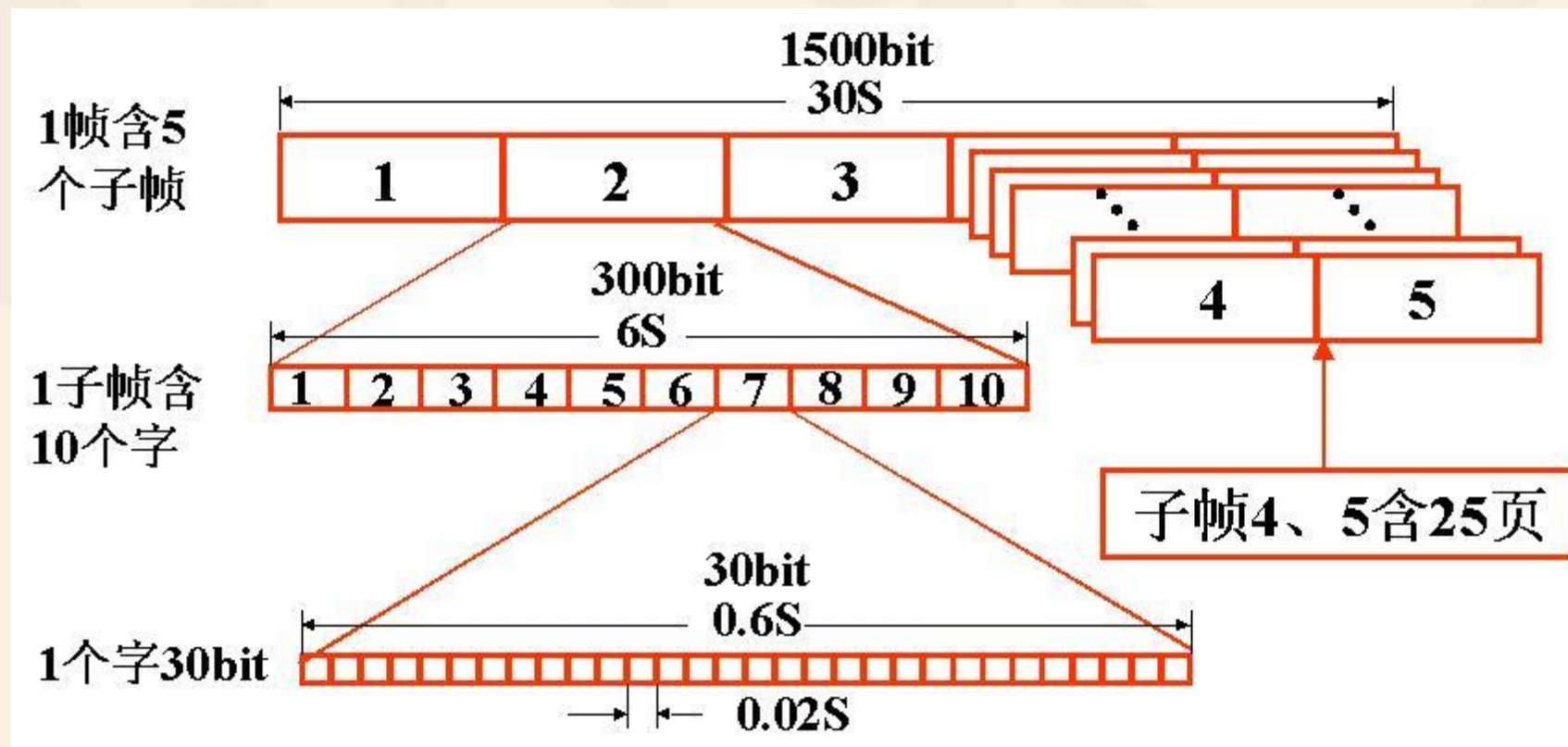
$$L_2(t) = A_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{p2})$$

- ❖ 式中**P(t),C(t)**——**P**码和**C/A**码的；
- ❖ **A_C,A_P**——振幅；
- ❖ **D(t)**——导航数据码。

3.2 导航电文

- ❖ 导航电文是卫星以二进制码的形式发送给用户的导航定位数据，故又称为数据码，或**D**码。它包括的内容主要有：卫星星历、卫星星钟改正、电离层延迟改正、工作状态信息和**C/A**码转换到捕获**P**码的信息、全部卫星的概略星历。

导航电文的格式



导航电文的格式

导航电文为二进制文件，按一定格式组成数据帧，按帧向外播送。每帧长度1500bit。完整的导航信息由25帧数据组成，播送速度为50bit/s，12.5min全部播完。

第1、2、3子帧播放该卫星的广播星历及卫星钟改正数：每小时更新一次。

第4、5子帧播放所有空中GPS卫星的历书（卫星的概略坐标）：地面注入站注入新的导航数据时才更新。

子帧1	TLW	HOW	数据块I
子帧2	TLW	HOW	数据块II
子帧3	TLW	HOW	
子帧4	TLW	HOW	数据块III
子帧5	TLW	HOW	数据块III
<div> <div>← 30b →</div> <div>← 30b →</div> <div>← 8 × 30b →</div> </div> <div>← 300b (6s) →</div>			

一帧导航电文的结构

Figure 1 illustrates the data frame structure of the CAN bus, showing three data frames (数据块1, 数据块2, 数据块3) and their corresponding bit sequences. The frames are labeled (1) 遥测码 (Telemetry Code), (2) 转换码 (Conversion Code), and (5) 第三数据块 (Third Data Block).

The bit sequences are shown in a table format, with bit positions and values. The frames are labeled (1) 遥测码 (Telemetry Code), (2) 转换码 (Conversion Code), and (5) 第三数据块 (Third Data Block).

Frame 1 (第一数据块) contains TLW (22), P6, HOW (22), P6, and a 32-bit data field. The bit sequence is: 1 31 61 91 121 137 151 167 181 197 211 219 241 249 271. The data field is labeled A0DC.

Frame 2 (第二数据块) contains TLW (22), P6, HOW (22), P6, and a 32-bit data field. The bit sequence is: 1 31 61 69 91 107 151 167 211 227 271 287. The data field is labeled A0DC.

Frame 3 (第三数据块) contains TLW (22), P6, HOW (22), P6, and a 32-bit data field. The bit sequence is: 1 31 61 77 121 137 181 197 241 271 279. The data field is labeled A0DC.

The frames are labeled (1) 遥测码 (Telemetry Code), (2) 转换码 (Conversion Code), and (5) 第三数据块 (Third Data Block).

P6 为比特奇偶校验, 所有2进制数据都为2的补数

遥测码：每个子帧的第一个字码。作为捕获导航电文的前导。

转换码：每个子帧的第二个字码。它的主要作用是帮助用户从捕获的C/A码转换到P码的捕获。

第一数据块：第一子帧的第3--10个字码。它的主要内容是：(1)标识码，指明载波L2的调制波类型、星期序号、卫星的健康状况等；(2)数据龄期；(3)卫星时钟改正系数。

第二数据块：第二和第三子帧共同构成。它表示GPS卫星的星历。这是GPS定位中最有用的电文。

(1) 开普勒6参数：

- 卫星轨道长半轴的平方根 \sqrt{A}
- 卫星轨道的偏心率 e
- 参考时刻 T_{oc} 的轨道倾角 i_0
- 参考时刻 T_{oc} 的升交点赤经 Ω_0
- 近地点角距 ω
- 参考时刻 T_{oc} 的平近点角 M_0

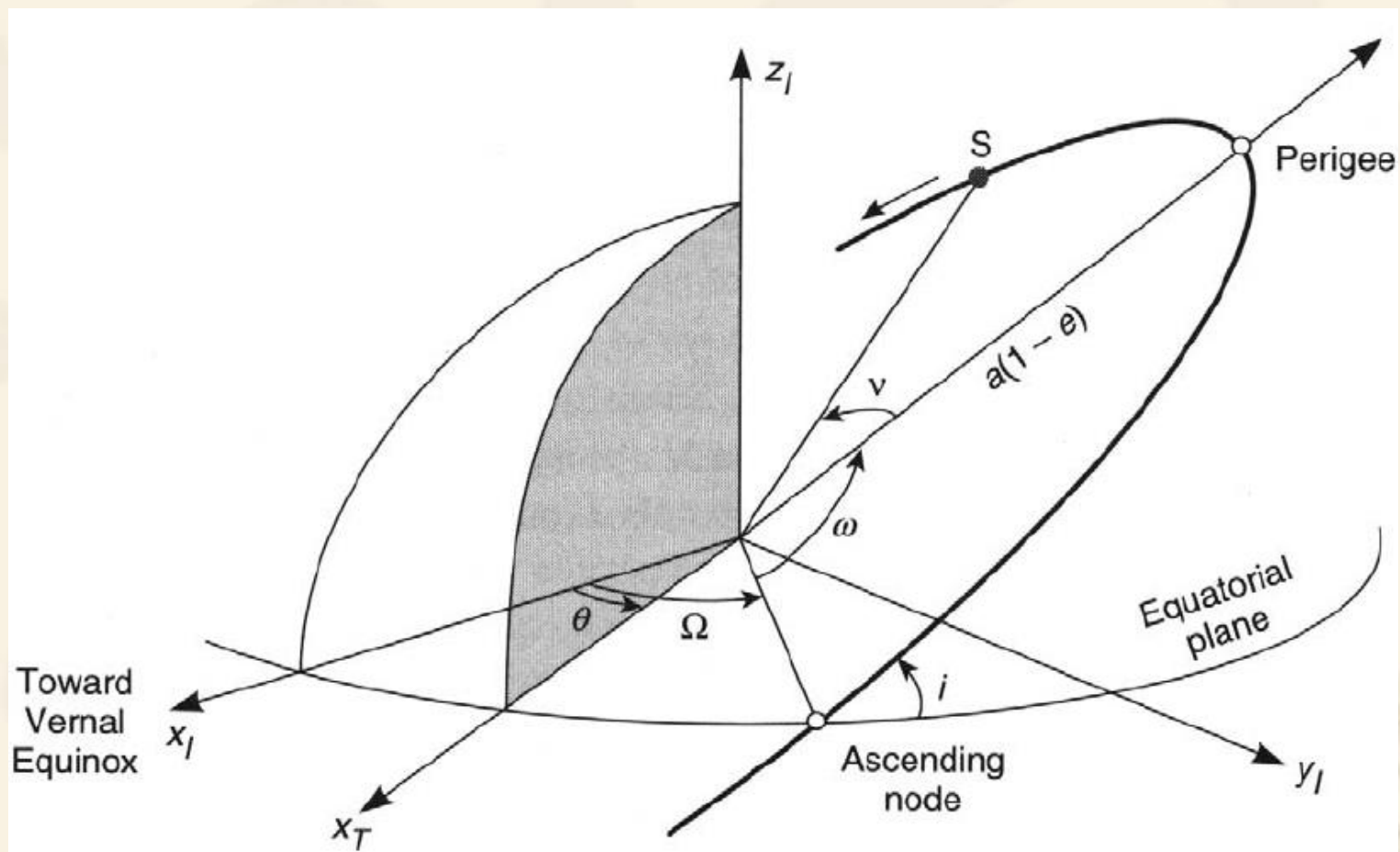
(3) 时间2参数

- 从星期日子夜零时开始的星历参考时刻 t_{oe}
- 星历表的数据龄期AODE(又称IODE),
 $AODE = t_{oe} - t_L$

式中, t_L 为预报星历测量的最后观测时间,
故AODE(IODE)为预报星历的外推时间间隔。

(2) 轨道摄动9参数

- 卫星平均运动角速度与计算值之差 Δn , 亦称平近地点角速度的改正数
- 升交点赤经的变化率 $\dot{\Omega}$
- 轨道倾角的变化率 \dot{i}
- 升交点距的正弦和余弦摄动改正项之系数 C_{uc}, C_{us}
- 轨道倾角的正弦和余弦摄动改正项系数 C_{ic}, C_{is}
- 轨道半轴的正弦和余弦摄动改正项之系数 C_{rc}, C_{rs}



卫星轨道描述

第三数据块：由第4和第5两个子帧构成。它提供GPS卫星的历书数据。当接收机捕获某颗卫星后，利用第三数据块提供其它卫星的概略星历、时钟改正、码分地址和卫星工作状态等数据。用户不仅能选择工作正常和位置适当的卫星，而且还可根据所在的位置，选择最佳星座，依据已知的卫星PRN号进行设置，以快速捕获和定位。

3.3 测距码（伪随机码PRN）

信号成分	C/A码	P码
载波频率 /MHz	1575.42	1227.60和1575.42
码元率(比特率)/(Mb/s)	1.023	10.23
码长	1023（=1ms）	约 6×10^{12} （7天）
码发生率	2个10级移位寄存器	4个12级移位寄存器

C/A码和P码

返回

❖ PRN的作用

测距

区分不同卫星的信号

导航电文的扩频合成

3.3.1 C/A码和P码的产生

GPS卫星发射的导航信号是将编码脉冲信号先经伪随机码扩频再对频率进行**BPSK**调制形成的信号。采用这种信号格式，不仅提高了系统的导航定位的精度，并使系统具有较高的抗电子干扰能力和保密性。

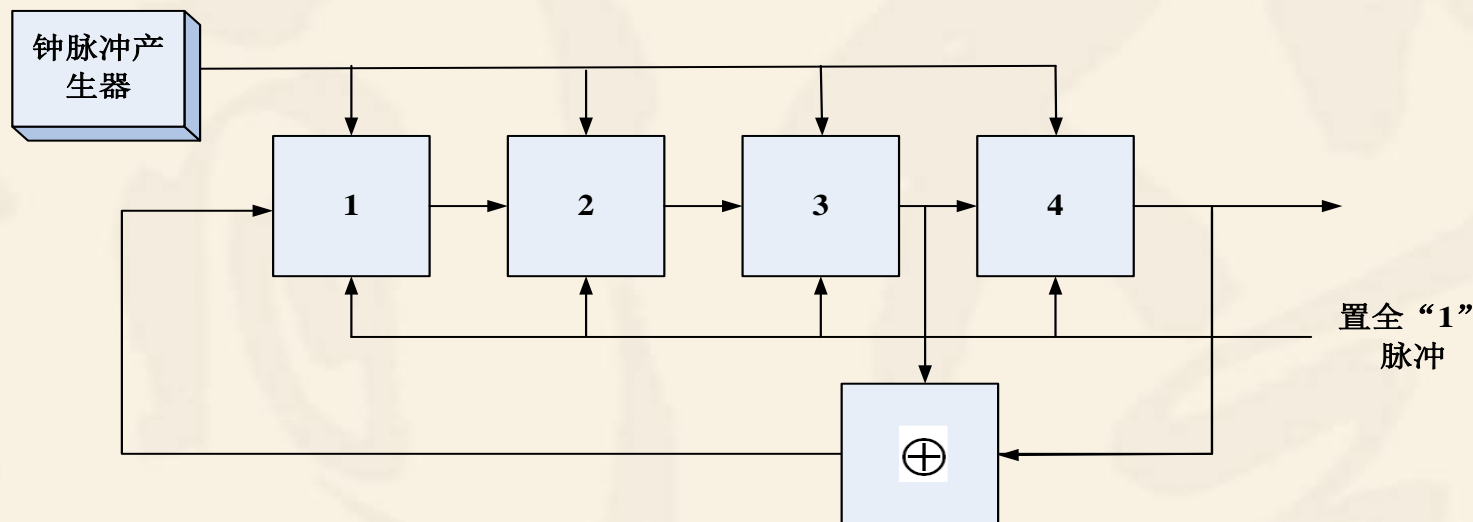
3.3.1 C/A码和P码的产生

找到具有良好自相关特性，又是周期性的，预先能确定的，能够复制的序列。

这也就是具有随机序列特性的非随机序列，称作伪随机序列。

二进制码元“0”和“1”组成的伪随机序列亦称作二进制伪随机噪声码（PRN码），简称伪码。

伪码的种类很多，GPS系统采用线性移位寄存器序列，它是由若干级带有某些特定反馈的移位寄存器产生的。



- ❖ 图中包括4级移位寄存器、模2相加反馈电路及钟脉冲产生器。移位寄存器第3、第4级的输出经模2相加再输送到移位寄存器的第一输入端。这种反馈属于线性反馈，这种线性反馈使4级移位寄存器产生周期最长的二进制序列，称作m序列，其周期为 $15t_0$ 。

- ❖ 初始时，在置“1”脉冲作用下，将移位寄存器各个单元均置成“1”，称全“1”状态。
- ❖ 第一级寄存器的状态受模2相加器的控制，第4级寄存器的内容便是输出的伪随机码**111100010011010**，当第16位脉冲到来时，又回到全“1”状态，各状态开始重复，呈现周期性，其周期等于 **$15t_0$** ， t_0 是钟脉冲的周期。
- ❖ 伪随机码的码元率就是控制移位寄存器的外部时钟频率。按照逻辑电路的原理，若寄存器有 r 级，这种循环移位寄存器输出的伪随机码的码长位 **$2^r - 1$** 。此处 $r=4$ ，则码长位**15bit**。

4级线性反馈移位寄存器的状态表

状态编号	各级状态				模2相加
	④	③	②	①	
1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	0	0
3	1	1	0	0	0
4	1	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0
6	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	1
8	1	0	0	1	1
9	0	0	1	1	0
10	0	1	1	0	1
11	1	1	0	1	0
12	1	0	1	0	1
13	0	1	0	1	1
14	0	0	1	1	1
15	0	1	1	1	1

- ❖ 在**GPS**系统中，利用伪码具有良好的相关特性，能拒收不需要的卫星信号，并区分开需要同时接收的不同卫星的信号。
- ❖ 可给不同的卫星指配不同的伪码，当接收某颗卫星信号时，用户只要给出这颗卫星设置指配的伪码作为本地的跟踪伪码，则对这颗卫星的信号进行跟踪时，相关函数值为1，而对别的卫星信号，其相关函数值极小。

- ❖ **GPS**系统中使用了两种伪随机码，一种是用于分址、搜捕卫星信号、粗测距、且具有一定抗干扰能力的粗/获码，称**C/A**码；另一种是用于分址、精密测距、具有强抗干扰能力的精码，称**P**码。
- ❖ **C/A**码发生器是由两组**10**级移位寄存器构成，基码长为 $2^r - 1 = 1023\text{bit}$ ，码发生器的时钟频率为 $f_0/10$ ，所以**C/A**码的码率为**1.023MHz**，周期为**1ms**。这里要说明的是无论是**C/A**还是**P**码发生器，它们的时钟频率均来自基准频率 f_0 。

❖ **C/A码**：由两个10级反馈移位寄存器相组合而产生。

$$G_1 = 1 \oplus X^5 \oplus X^{10}$$

$$G_2 = 1 \oplus X^2 \oplus X^3 \oplus X^6 \oplus X^8 \oplus X^9 \oplus X^{10}$$

C/A码是两个m序列**G1**和**G2**经模2相加（即波形相乘）得到的乘积码，

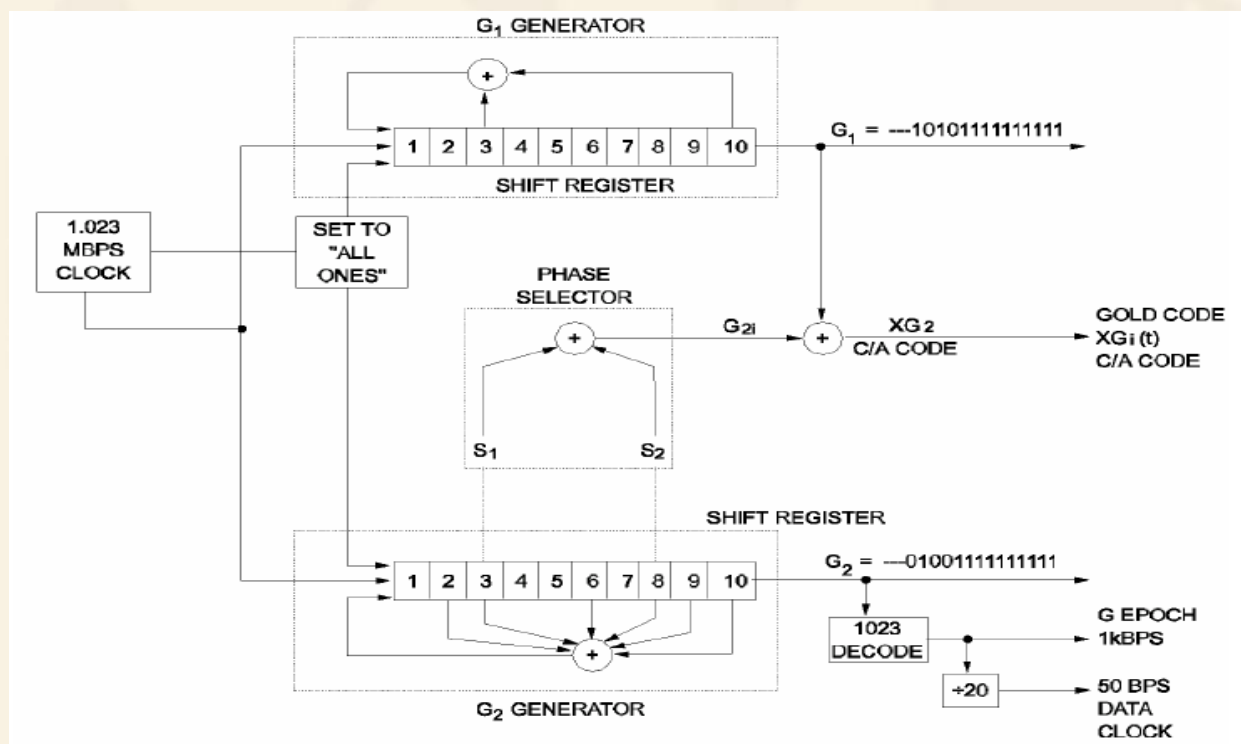
$$C/A_i = G_1(t)G_2(t + n_it_0)$$

式中 $n_i=1,2,\dots, (2^{10}-1)$

$$1/t_0=1.023\text{MHz}$$

因此，加上**G₁**和**G₂**本身，总共有1025个不同结构的 **C/A码**，**i** 对应于卫星，所以每颗卫星发射唯一一组**C/A码**。

❖ **C/A码**：由两个10级反馈移位寄存器相组合而产生。



C/A码的产生示意图

C/A码的码长易于捕获，且通过C/A码提供的信息，又可方便的捕获P码。C/A码的码元宽度较大。假设两个序列的码元对齐误差，为码元宽度的1/100，则相应的测距误差达2.9m，因此也称粗码。

码长 $N_u = 2^{10}-1=1023$ 比特

码元宽 $t_u = 1/f_1 \approx 0.977752 \mu s$

(相应距离为293.1m)

周期 $T_u = N_u t_u = 1ms$

数码率 = 1.023Mbit/s

❖ P码

GPS卫星发射的P码，其产生的基本原理与C/A码相似，但其发生电路，是采用两种各由两个12级反馈移位寄存器构成的，情况更为复杂。线路设计细节均是保密的。P码特征：

码长 $N_u \approx 2.35 \times 10^{14}$ 比特

码元宽度 $t_u \approx 0.0977752 \mu s$

(相应距离为29.3m)

周期 $T_u = N_u t_u \approx 266$ 天

数码率=10.23Mbit/s

P码周期被分为38部分（7天/每一部分周期，码长约为 6.19×10^{12} 比特），其中1部分闲置，5部分给地面监控站使用，32部分分配给不同的卫星。这样，每颗卫星所使用的P码不同部分，便都具有相同的码长和周期，但结构不同。

❖ P码

P码的码长较长，无法采用C/A码逐个进行搜索。一般都是先捕获C/A码，然后根据导航电文中给出的有关信息，捕获P码。

由于P码的码元宽度为C/A码的 $1/10$ ，若取码元的对齐精度仍为码元宽度的 $1/100$ ，则由此引起的相应距离误差为 0.29m ，仅为C/A码的 $1/10$ 。所以P码定位精度高，故也称为精码。

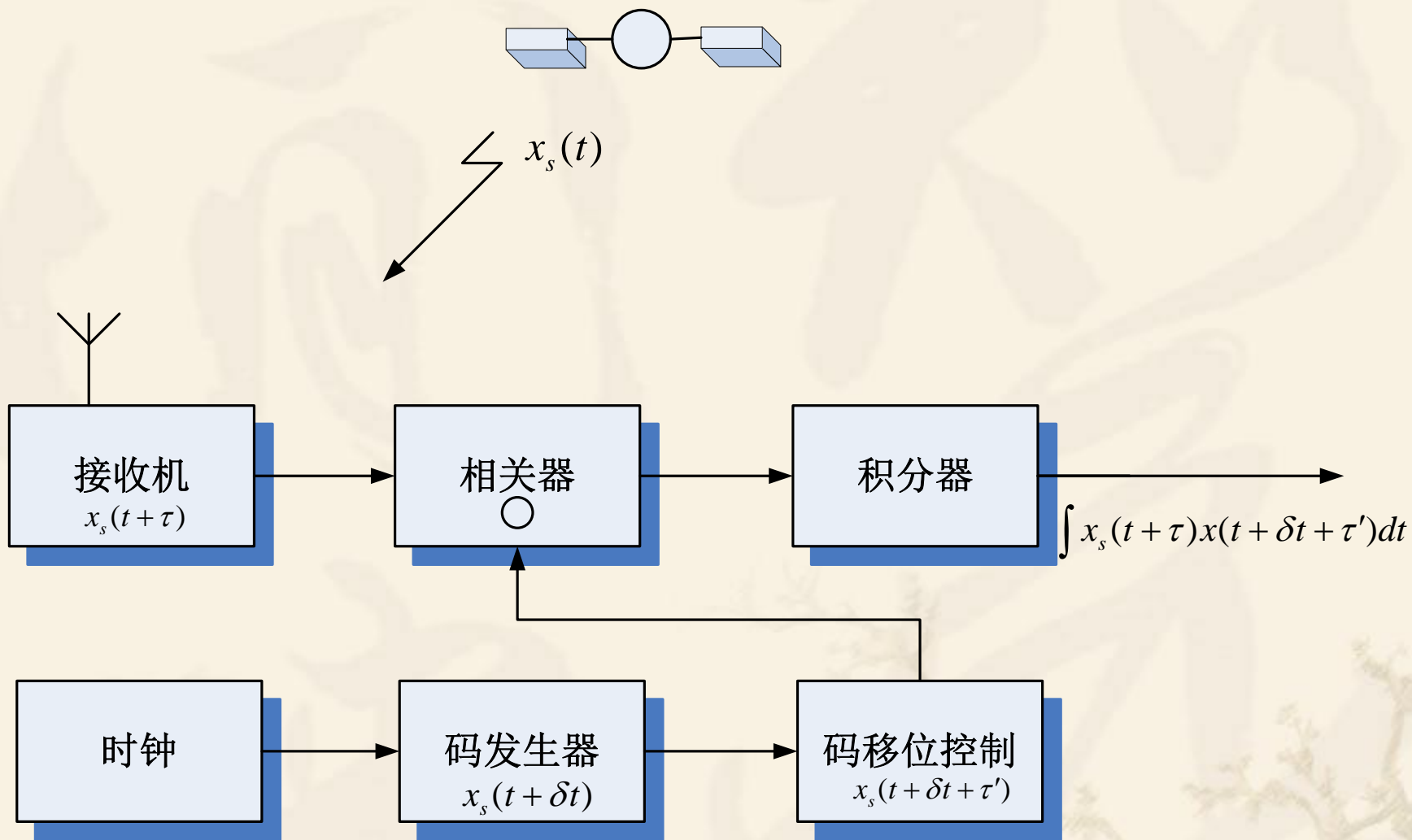
3.3.2 C/A码与P码的特性

- ❖ C/A码是由两个10级线性反馈移位寄存器产生的级序列和模2相加产生的序列。
- ❖ C/A码周期短（1ms），码率低（1.023 MHz），码长小（1023 bit），不同结构的码类较少，因而抗干扰性及保密性较差，测距精度较低，用做粗测距的民用码。
- ❖ 但由于它周期短，码率低，对其搜捕所需时间少（约82 s），因而把它用做搜捕码，以便快速捕捉卫星信号。

- ❖ **C/A码**的码长相应为**299.792 km**，因此，用**C/A码**测距，在**300 km**内无模糊度问题。
- ❖ **P码**则是由**4个12级线性反馈移位寄存器**输出的**m序列**的截短序列模**2**相加产生的复合序列。**P码**周期长（**7天**），码率高（**10.23 MHz**），码长大（**6 187 104 bit**），码类多，因此用做精测距、抗干扰及保密的军用码。**P码**的码元宽度为，相当于距离**29.3 m**，所以，若码元对准误差采用码元宽的时，则测距误差约为**2.93~0.293 m**，仅为**C/A码**的**1/10**。
- ❖ 由于**P码**很长，不容易捕获，故须利用**C/A码**进行捕获。

3.4 伪随机码测距

- ❖ 无线电测距的基本原理，就是测定电磁波传播时间（或称信号的传播延迟），从而得到距离观测量
- ❖
$$\rho = c\tau$$
- ❖ 式中 c —电磁波传播速度。
- ❖ 伪随机码测距也是以此为基础的，下面是伪随机码测距原理图。



伪随机码测距原理图

- ❖ 由卫星钟控制的伪随机码 $x_s(t)$ ，从卫星天线发播，经传播延迟 τ 到达接收机。接收机接收到的卫星信号为 $x_s(t + \tau)$ 。
- ❖ 由接收机时钟控制的本地码发生器产生一个与卫星伪随机码相同的本地码 $x(t + \delta t)$ ， δt 为接收机时钟与卫星时钟的钟差。经码移位电路将本地码移位（延迟） τ' 得到 $x(t + \delta t + \tau')$ ，将其送至相关器与所接收到的卫星信号 $x_s(t + \tau)$ 进行相关运算，经积分器可得相关输出

$$R(\Delta\tau) = \int x_s(t - \tau)x(t + \delta t - \tau')dt$$
$$\Delta\tau = (t + \delta t + \tau') - (t + \tau)$$

- ❖ 如果调整本地码延迟 τ' ，使相关输出达到最大值，根据伪随机码的自相关特性，可知

- ❖
$$R(\Delta\tau) = \max \quad \Delta\tau = nT (n = 0, 1, 2, \dots)$$

- ❖ 则

- ❖
$$\tau' = \tau - \delta t - nT$$

- ❖ 式中 T —伪随机码的周期； n —整周期数， $n=0, 1, 2, \dots$ ； τ' —所测定的本地码延迟。

- ❖ 因此，当测得本地码延迟 τ' 后，即可得

- ❖
$$\rho' = \rho + c\delta t - n\lambda$$

- ❖ 式中 ρ' —所测定的距离观测值， $\rho' = c\tau'$ ； ρ —卫星信号传播距离， $\rho = c\tau$ ； λ —伪随机码的波长， $\lambda = cT$ 。

- ❖ 上式为伪随机测距的基本方程，其中称为测距模糊度。在使用单一周期信号测距时，如果信号波长小于所测距离，则存在模糊度问题。

- ❖ 用**GPS**的**P**码测距时，由于其波长远大于所测距离，此时 $n = 0$ ，则

$$\rho' = \rho + c\delta t$$

- ❖ 称为无模糊测距。用**C/A**码测距，其波长 $\lambda \approx 300km$ 。只要知道卫星至接收机的概略距离精确至**300 km**，即可确定**n**值。此时， $\rho' = c(\tau' + nT)$ 也就没有模糊度问题。

- ❖ 接收机时钟与卫星时钟的钟差 δt ，使所测定的距离 ρ' 不等于卫星至接收机间信号传播距离。我们称此为伪距观测值。若能精确求出接收机时钟和卫星时钟相对**GPS**基准时的钟差，即求得 δt 予以修正，则可由 ρ' 求得 ρ 。实际上，卫星时钟钟差在导航电文中已给出，而接收机时钟钟差不知道，在定位解算中常作为一个待定参数。因此，观测伪距定位，需至少同步观测**4颗GPS**的伪距。

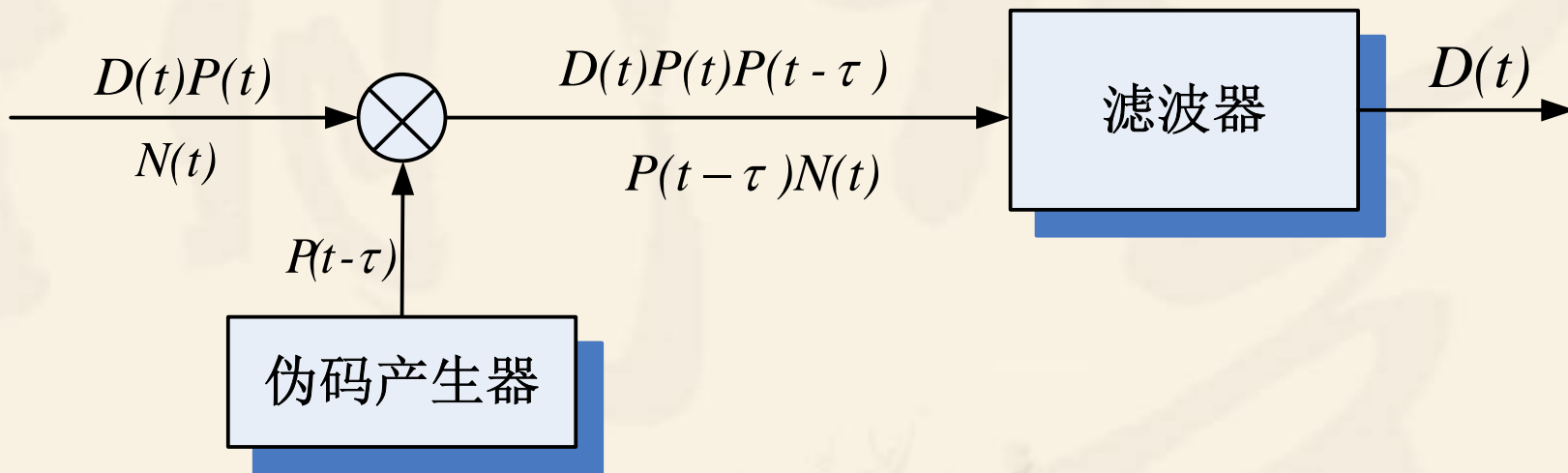
3.5 GPS接收机的工作原理

❖ 卫星发射的信号表示为:

$$L_1(t) = A_c C(t) D(t) \sin(2\pi f_1 t + \varphi_c) + A_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{p1})$$

$$L_2(t) = A_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi_{p2})$$

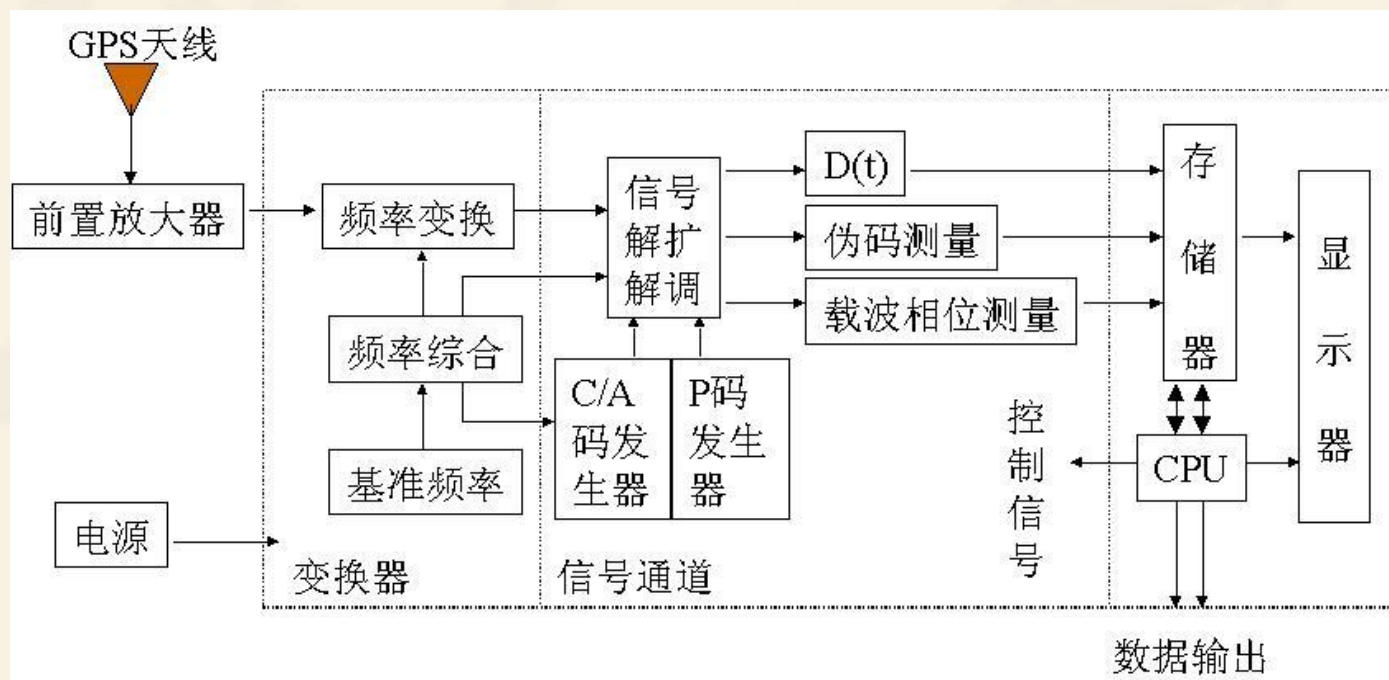
❖ 含有三组成分（**L1, C/A, D**），（**L1, P, D**）和（**L2, C/A, D**）。GPS接收机信号处理的目的是要恢复这些信号分量，包括卫星码信号的捕获，伪码的跟踪，重构载波和解释信息码以获得卫星钟读数和导航电文，并进行导航计算。



信号的相关接收原理

GPS接收机的组成

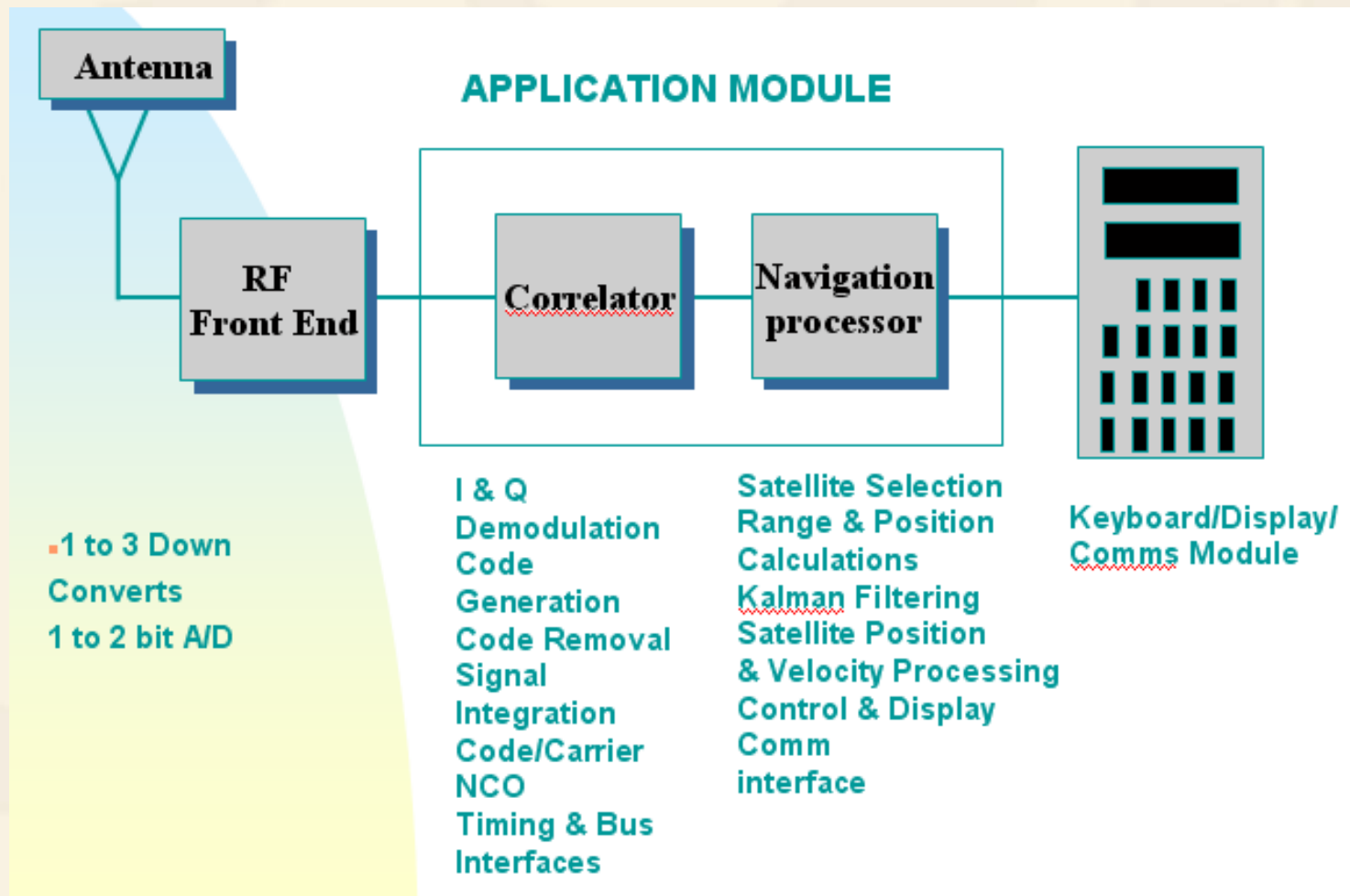
GPS接收机也可称为用户装置。主要由天线、接收机、微处理机和输入输出部分组成。其主要结构框架（单频接收机）如图所示。



全向圆极化天线接收卫星发射的频率为扩频导航信号，经前置放大后进行变频。

前置放大器是宽带低噪载频放大器，用来改善信噪比。

接收通道采用多次变频的方法，这是因为从卫星接收的信号很弱，多次变频可使接收通道得到稳定的高增益，并有利于抑制镜像频率信号干扰。



GPS接收机的信息输出与使用

接收机的工作过程

1. 选择卫星

- ❖ 从可见星（4~9颗）中选择几何关系最好的4颗星。因此用户必须预先知道24颗星的粗略星历，若刚投入使用而没有这种数据，用户就须搜捕卫星信号。只要捕获并跟踪到1颗卫星的信号，便可从其第5子帧取得24颗星的粗略星历。一旦有了这些数据，再根据用户自身的估计位置，计算机就可按卫星仰角大于 5° ，对用户而言卫星相互张开角度都较大的原则，选出4颗卫星。

2. 搜捕和跟踪被选卫星的信号

信号的搜捕就是检测伪随机码自相关输出的极大值，通常是采用相关试探的方法进行搜捕。

先选某一初相的本地码与所接收的卫星码进行相关检测，如果这时相关输出为低电平，则移动本地码（通常移动半个码元），再看相关输出的电平，如果为低电平，则再次移动本地码，直到取得最大相关输出（高电平）。

尽管这一过程是由电路自动搜索和检测的，但考虑到自相关函数是通过积分运算后输出，本地码不能移动过快，否则将会漏掉相关输出的峰值。

当所使用的伪随机码码长很长时，所需花费的时间是相当可观的。这就是所谓捕获问题。

3. 测量伪距并进行修正

- ❖ 利用时间标记和子帧计数测量出用户和卫星之间的伪距，并用测得的伪距变化率对其进行大气附加延时的修正。只用C/A码的接收机无法进行此项大气附加延时的修正。

4. 定位计算

- ❖ 计算机根据星历、卫星时钟校正参量、修正后的伪距离及初始装订的数据等，采用经典导航定位算法或卡尔曼滤波定位算法，由4颗卫星的信息计算出用户的位置、速度等信息。

GPS接收机的分类

- ❖ 按用途分类：导航型、测地型、授时型、测姿型；
- ❖ 按接收机的载波频率分类：单频接收机、双频接收机；
- ❖ 按接收机通道数分类：多通道接收机、序贯通道接收机；
- ❖ 按接收机工作原理分类：码相关接收机、平方型接收机、混合型接收机；

GPS接收机的指标

- ❖ 定位精度
- ❖ 定位时间和捕获性能
- ❖ 动态范围
- ❖ 通道数
- ❖ 工作环境要求
- ❖ 信号输出率以及接口特性

