



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

GNSS授时技术

汇报人：方陈鑫 赵天羽

小组成员：方陈鑫 赵天羽 杨新宇 郑佳明

时间：2024.12.9



目录

CONTENTS

.....

01

时间标准

02

时间标准

03

GNSS授时误差来源的分析





中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

01

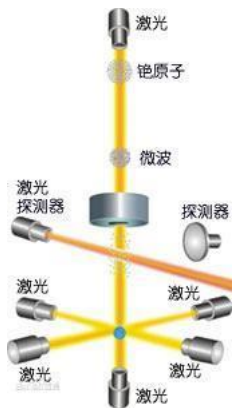
时间标准



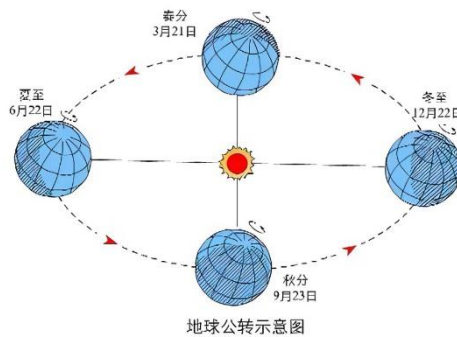
1.1 UTC时间

近代科学技术对于时间计量的要求，包括两个方面的内容：时刻和时间间隔。大地测量、天文导航和宇宙飞行器的跟踪、定位，需要知道以地球自转角度为依据的世界时时刻刻；而精密校频等物理学测量，则要求均匀的时间间隔。

20世纪50年代末期，铯原子钟进入实用阶段以后，各国的时间服务部门都以它为基准发播标准时间和频率信号，就面临一种困难局面：要用同一个标准振荡器同时满足性质不同的两种要求。为了解决这个矛盾，在1960年国际无线电咨询委员会和1961年国际天文学联合会的会议上，提出协调的具体方案，即规定采用一种介乎原子时与世界时之间的时间尺度，用于发播标准时间和频率信号。这种时间尺度是世界时时刻刻与原子时秒长折中协调的产物，称为协调世界时（UTC）。UTC是由两个时间标度共同组成的一个复合的时间标度。这两个时间标度分别是国际原子时（TAI）和以地球绕太阳旋转速率为基础测得的时间标准（UT1）。



国际原子时（TAI）是以原子秒的秒长为基础的均匀时间标度。原子秒的长度规定如下：铯133原子基态的两个超精细能级之间的跃迁所产生辐射的9192631770个周期的持续时间。位于不同国家不同地区的50多个定时实验室对应的原子标准为原子秒提供基准，TAI由专门的机构国际计量局（BIPM）负责计算处理，通过统计各国提供的数据以输出最终的TAI。由此可以看出，TAI并不由一个实际的钟来提供标准，所以，它也被称为纸面上的时间标度。



UT1是以地球绕太阳公转的速率为基础测得的，考虑到地球旋转存在变化，因此，UT1的时间标度并不是均匀的。UT1的时间标准是由国际地球自转服务组织（IERS）负责最后确定的。同时，UT1相对于原子时（TAI）存在漂移，其漂移量大约为每天几个毫秒，一年下来相位漂移总量累计在1秒左右。IERS负责在恰当时间给UTC加上或减去闰秒，以确保UT1和UTC之间的偏差不超过0.9秒。因此，UTC可以在1秒的量级上与太阳时保持一致。

1.2 UTC时间调整

在1960~1971年期间，协调世界时以原子时为基础，通过频率调整（又称频率补偿）和无线电秒信号突跳（又称跳秒），使其所表示的时刻与世界时UT2的时刻之差保持在0.1秒（1963年以前为0.05秒）以内。每年的频率调整和跳秒的数值，由国际时间局根据前一年的天文观测来确定。

1972年以前的协调世界时，由于采用频率调整，它的秒长逐年变化，这给实际应用造成许多不便。为此，国际天文学联合会和国际无线电咨询委员会在1971年决定，从1972年1月1日起，采用一种新的协调世界时系统。在新系统中，取消频率调整，协调世界时秒长严格等于原子时秒长，必要时作一整秒的调整，使协调世界时时刻与世界时UTC之差保持0.9秒（1974年以前0.7秒）以内。

全球已经进行了27次闰秒，均为正闰秒。2022年11月18日，科学家和政府代表在法国举行的一次会议上投票决定将到2035年取消闰秒。这项“历史性决定”将允许“秒数连续流动，而不会出现目前由不规则闰秒造成的不连续性。根据决议，闰秒将暂时继续正常添加。但到2035年，世界时和国际原子时之间的差异将被允许增长到大于一秒的值。

实施年份	6月30日23:59:60	12月31日23:59:60	实施年份	6月30日23:59:60	12月31日23:59:60
1972年	+1秒	+1秒	1989年	—	+1秒
1973年	—	+1秒	1990年	—	+1秒
1974年	—	+1秒	1992年	+1秒	—
1975年	—	+1秒	1993年	+1秒	—
1976年	—	+1秒	1994年	+1秒	—
1977年	—	+1秒	1995年	—	+1秒
1978年	—	+1秒	1997年	+1秒	—
1979年	—	+1秒	1998年	—	+1秒
1981年	+1秒	—	2005年	—	+1秒
1982年	+1秒	—	2008年	—	+1秒
1983年	+1秒	—	2012年	+1秒	—
1985年	+1秒	—	2015年	+1秒	—
1987年	—	+1秒	2016年	—	+1秒



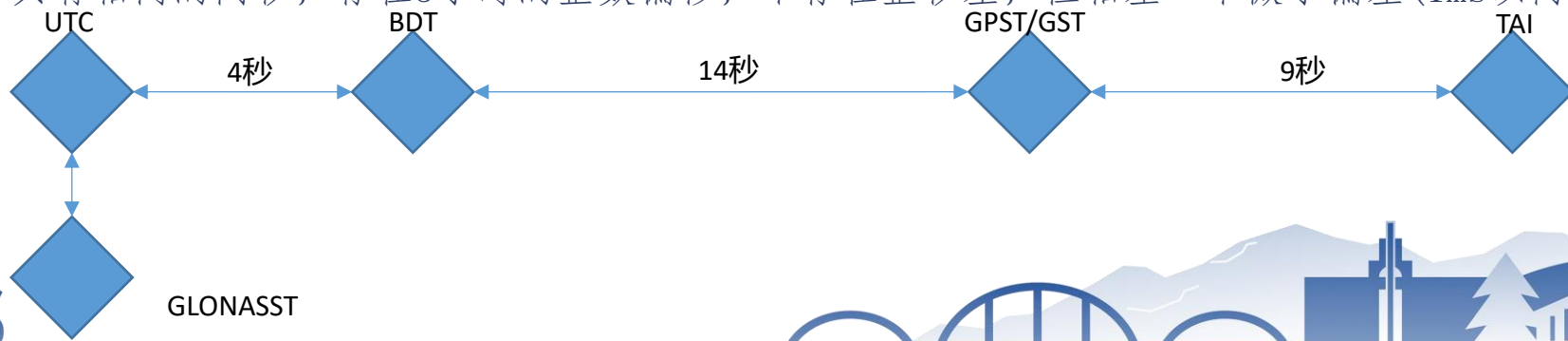
1.3 GNSS时间标准

GPS向全球用户发布时间标准GPST，为各用户提供时间同步服务。该时间标准是以协调世界时(UTC)为基础的。它的时间基准是1980年1月6日0点与世界协调时刻相一致，以后按原子时秒长累积计时。由于闰秒，与UTC时偏差已经达到18秒，即GPS时=UTC时+18（GPS时要往后拨慢18秒，其时间的显示才和UTC时一样）。

Galileo时间GST与GPST一致。

BDS采用的时间基准为北斗时（BDT），BDT与UTC之间的跳秒信息在卫星播放的导航电文中播报。以秒为基本单位而连续累计，不用调秒的形式，起始历元为协调世界时（UTC）2006年1月1日0时0分0秒，采用周和周内秒的计数形式。由于存在着闰秒的影响，从GPST的起算时间1980年1月6日0时0分0秒到BDT的起算时间2006年1月1日0时0分0秒共有正闰秒14s，所以BDT和GPST周秒间存在14秒的差异。

GLONASS时间系统GLONASST亦采用原子时TAI秒长作为时间基准，是基于前苏联莫斯科的协调世界时UTC（SU），采用的UTC时并含有跳秒改正。与GPS时相类似，GLONASS也建立了自己专用的原子时用于全球的导航与定位。与GPS时不同的是它是以采用莫斯科时间为标准，以俄罗斯（前苏联）维持的UTC(SU)作为时间度量的基准。GLONASST与UTC(SU)具有相同的闰秒，存在3小时的整数偏移，不存在整秒差，但相差一个微小偏差(1ms以内)。





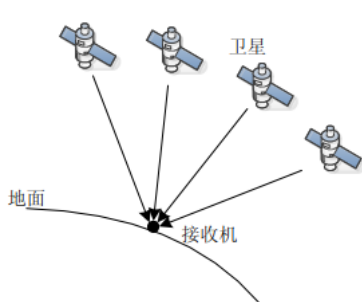
中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

02

GNSS授时方法



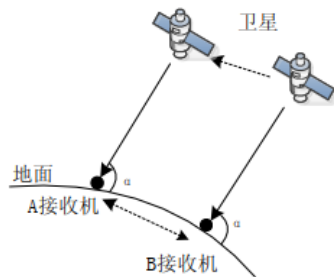
2.1 单向授时



单站
法

单站法有两种情况，一种是已知接收机精确位置，可以通过任意可见卫星进行授时应用；另一种是位置未知，可以通过跟踪多颗星的信号，通过定时方程计算出钟差时间信息，然后调整本地时间与卫星时间实现同步。

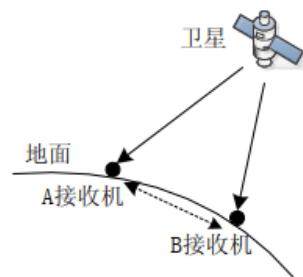
单站法授时对设备需求较少，可以应用在多数的工作场景。



飞跃
法

飞越法一般用于多个用户的时间比对。位于地面不同位置的用户，以相同仰角对同一导航卫星进行观察，然后将测量得到的数据信息进行比较，计算出不同位置处的时钟之差，并依此进行调整，实现时间比对。

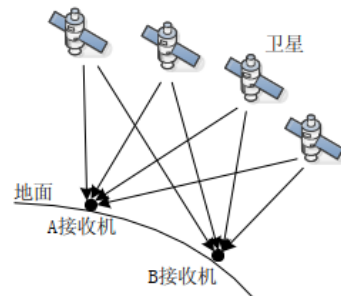
该方法可以抵消多数的星历误差和路径误差等共模误差，获得比单站法更高的授时精度，其授时精度约为 $10\sim 30\text{ns}$ 。



单星共视
法

单星共视法是指处于不同地点的两个用户，在同一时刻对同一颗可见导航卫星进行观测，在解算两个用户间的时间差时可以有有效的消除星历误差等共模误差。

通过实时或者事后进行数据交换，即使是使用较为简易的接收机也可以在两个用户间实现误差在 10ns 左右的时间比对精度。

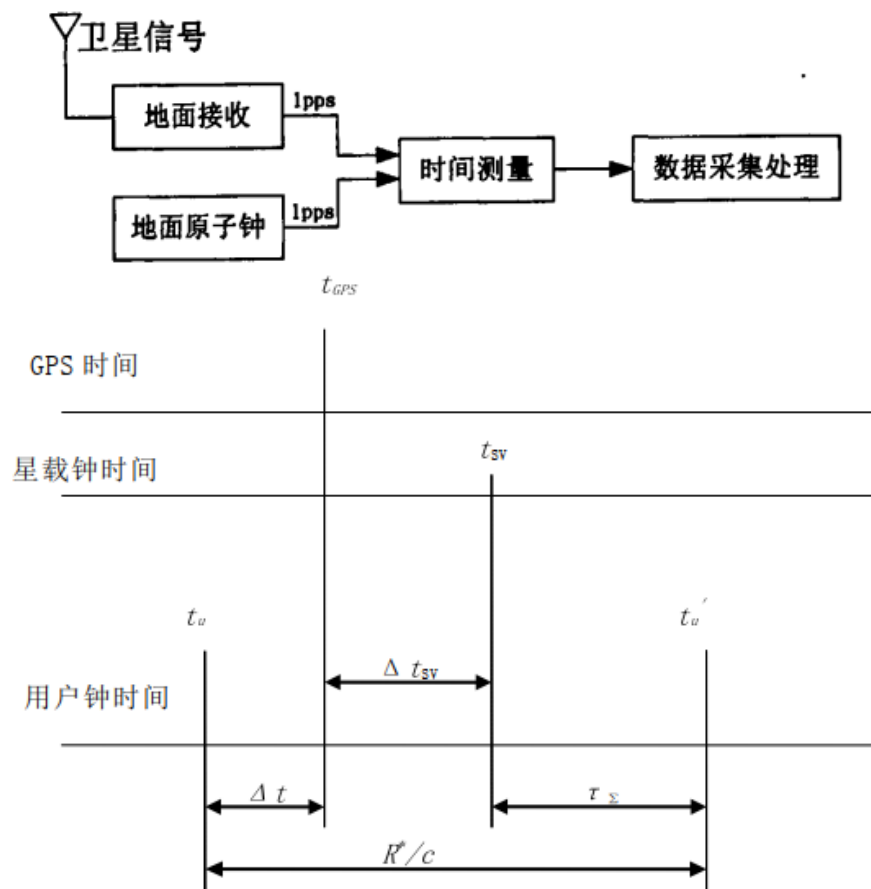


多星共视
法

多星共视法与单星共视法具有相同的原理，如图所示。多个用户在相距一定距离的基线上同时对相同的可见星进行跟踪，提取有用的时间信息，相互之间进行比较，消除公共误差，其时间比对精度可达亚纳秒级。



2.1 单向授时



在已知位置的授时方法，一般采取无源授时方式，处理过程如下：

(1) 接收卫星发送的导航电文信息，通过伪码测距法或者载波相位测距法解出星地之间的伪距 R ；

(2) 因为地面坐标和卫星坐标都是已知的，所以就可以直接求得信号的传输时间 R/c 。

(3) 消除传输时间中的其他的误差，包括电离层对流层延迟，设备传输延迟等，最后获得地面接收机钟和星载钟的偏差；

(4) 用导航电文中给出的参数 a_0 , a_1 , a_2 ，以及下式获得卫星钟相对系统时的偏差；

(5) 补偿卫星钟与系统时的偏差，最后得到地面钟与系统时的偏差 Δt 。



2.1 单向授时

计算出各部分的时间，从而得到地面钟与系统时的偏差。

$$\Delta t = R^* / c - (t_u' - t_{GPS})$$

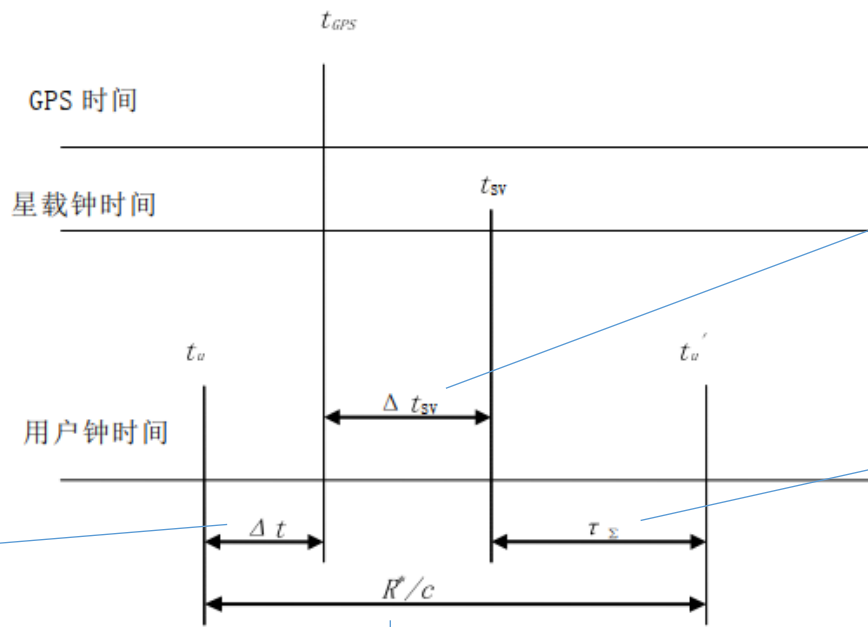
式中

R^* ——伪距

c ——光速

t_u' ——用户钟时刻

t_{GPS} ——GPS时刻



$$R^* / c = \Delta t + \Delta t_{SV} + \tau_{\Sigma}$$

式中

Δt_{SV} ——GPS时间比对星载钟时的差值

τ_{Σ} ——星地总时延

$$\Delta t_{SV} = a_0 + a_1(t_s - t_0) + \frac{a_2}{2}(t_s - t_0)^2 + \int y(t)dt$$

其中：

t_s ——为卫星钟读数

t_0 ——星载钟的起始时间

a_0 ——星载钟的起始相位漂移

a_1 ——星载钟的起始频率漂移

a_2 ——星载钟的频率漂移率

$$\tau_{\Sigma} = \tau_R + \tau_i + \tau_l + \tau_r$$

式中

τ_R ——星地总时延

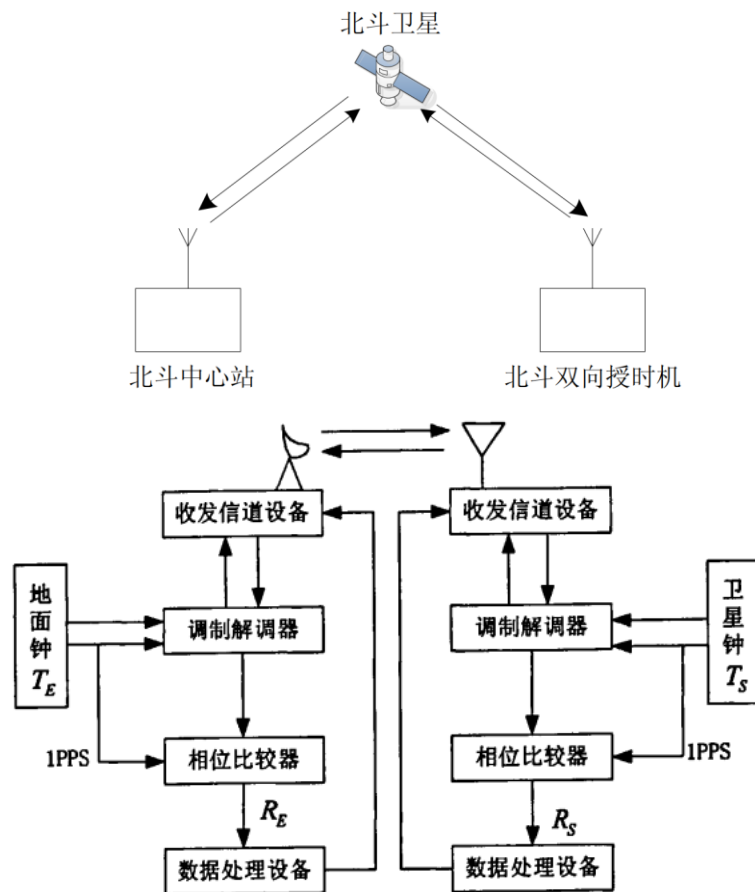
τ_i ——附加时延（电离层）

τ_l ——附加时延（对流层）

τ_r ——用户时延（接收机本身）



2.2 双向授时



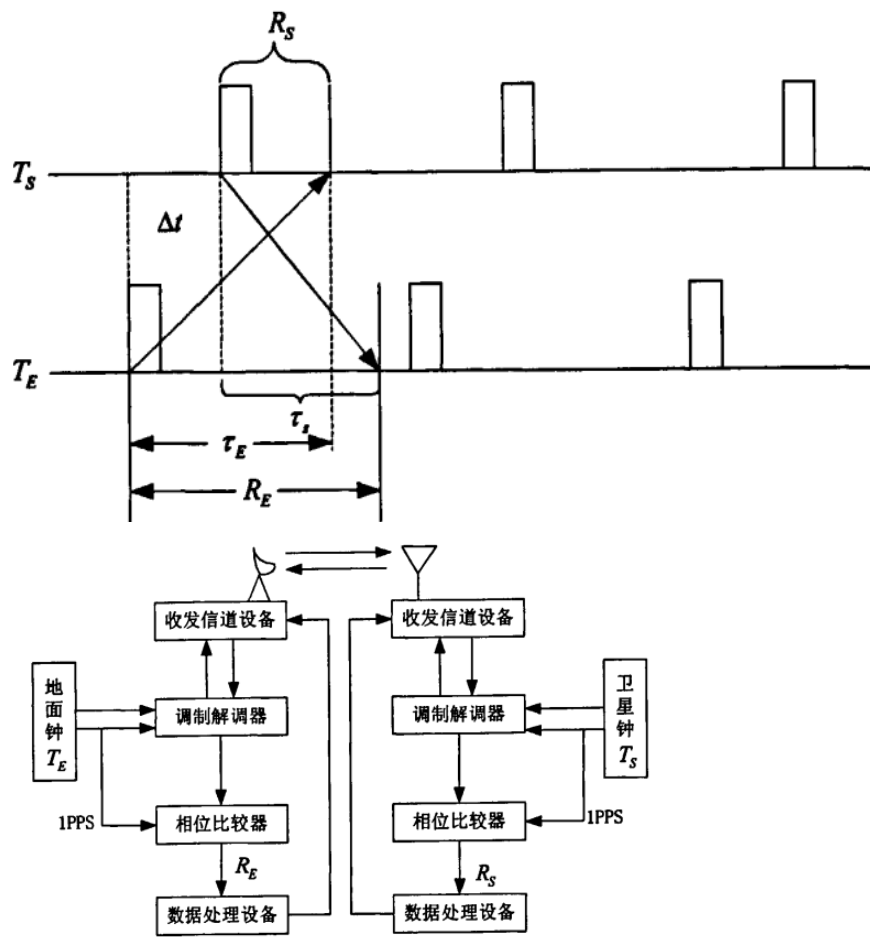
用户终端设备分别接收到地面站、卫星传送的标准时间和卫星位置信息，用户终端将接收的信号与本地时钟进行比对后反馈至地面中心，地面中心计算出差值后传输给用户，用以调整本地时钟与其对齐。

地面原子钟将秒脉冲和其他信号一起输入到调制解调器，编码后发送给卫星，卫星接收到信号后通过调制解调器将信号解调，获得秒脉冲信号，与卫星钟 T_S 的秒脉冲信号比对，得到差值 R_S 。卫星钟的秒脉冲信号也同时发送到地面基站，地面站将其解调后获得与地面钟 T_E 的秒脉冲信号的差值为 R_E 。

在进行这样的双向信号比对后，卫星向地面发送测得的数据，地面的计算机对数据进行进一步处理，最后得到星载钟与地面原子钟的差值 Δt 。



2.2 双向授时



由图可知：

$$\tau_E = T_E(t) - T_E(t - \tau_E)$$

$$\tau_S = T_S(t) - T_S(t - \tau_S)$$

$$R_E = T_E(t) - T_S(t - \tau_S)$$

$$R_S = T_S(t) - T_E(t - \tau_E)$$

则有：

$$T_E(t) - T_S(t) = [T_E(t) - T_S(t - \tau_S)] - [T_S(t) - T_S(t - \tau_S)] = R_E - \tau_S$$

$$T_E(t) - T_S(t) = -[T_S(t) - T_E(t - \tau_E)] + [T_E(t) - T_E(t - \tau_E)] = -R_S + \tau_E$$

因此，得到星地时差 $\Delta t = T_E - T_S = \frac{R_E - R_S}{2} + \frac{\tau_E - \tau_S}{2}$

考虑到信号的传播路径基本相同， $\tau_E - \tau_S$ 中的电离层和对流层延迟可基本消除，剩下的仅为设备时延，再考虑到相对论效应，则星地时间差

$$\begin{aligned} \Delta t &= T_E - T_S \\ &= \frac{R_E - R_S}{2} + \frac{(T_{IE} + T_{RS}) - (T_{IS} + T_{RE})}{2} + \tau \\ &= \frac{R_E - R_S}{2} + \frac{(T_{IE} - T_{RE}) - (T_{IS} - T_{RS})}{2} + \tau \end{aligned}$$

其中： $T_{IE} - T_{RE}$ 是地面站发射机与接收机时延差；

$T_{SS} - T_{RS}$ 是星上发射机与接收机的时延差；

τ 是各种误差的修正值。



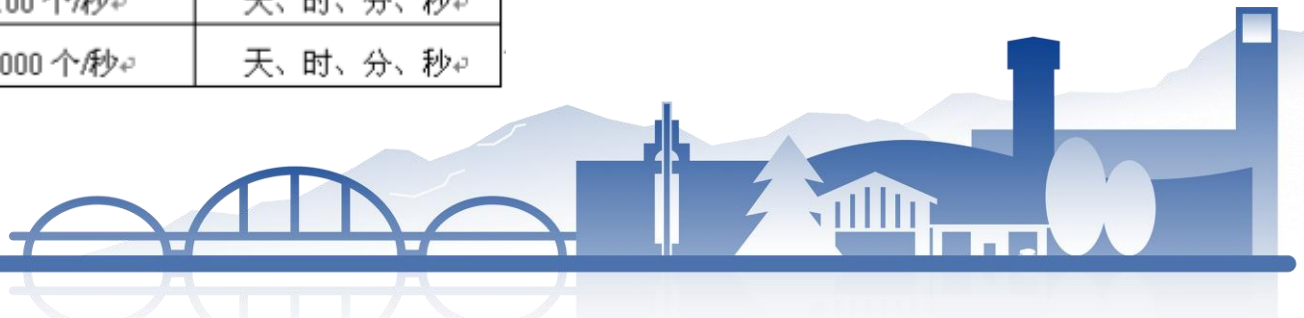
2.3 IRIG时间码

将时间信息按照顺序和既定格式进行编码称为“时码”。IRIG-B 格式的时间码（B 码）是串行 BCD 调制码的一种，普遍用于各类系统的时间同步，其优越稳定的性能为国际通用时间格式码。

格式	时帧周期	码元速率	表示的时间信息
IRIG-D	1 小时	1 个/分	天、时
IRIG-H	1 分	1 个/秒	天、时、分
IRIG-E	10 秒	10 个/秒	天、时、分、10 秒
IRIG-B	1 秒	100 个/秒	天、时、分、秒
IRIG-A	0.1 秒	1000 个/秒	天、时、分、秒、0.1 秒
IRIG-G	0.01 秒	10000 个/秒	天、时、分、秒、0.1 秒、0.01 秒

IRIG-B 分为 DC 码（直流码）、AC 码（交流码）。其中，AC 码一般用于远程传输，DC 码用于短距离传输。IRIG-B（AC）格式 1 个时帧周期（1s）内有 1000 个周期脉冲，而 IRIG-B（DC）格式 1 个时帧周期（1s）内有 100 个周期脉冲，但二者包含信息完全相同。

格式	时帧周期	码元速率	包含时间信息
IRIG-B（DC）	1 秒	100 个/秒	天、时、分、秒
IRIG-B（AC）	1 秒	1000 个/秒	天、时、分、秒



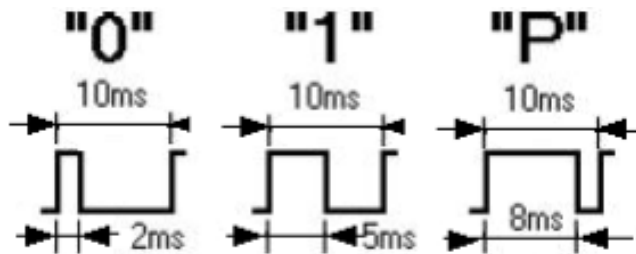
2.3.1 IRIG - B(DC)时间码

IRIG-B(DC) 是一秒一帧的时间串码，秒信息是以连续两个 8ms 宽脉冲开始，从第 2 个 8ms 对码元进行编码，分别为第 0, 1, 2, ..., 99 个码元。

B 码时间格式中包含有天、时、分、秒，所占信息位为秒 7 位、分 7 位、时 6 位、天 10 位，占 P0~P5 位，P6~P9 中含有其他控制信息。其中“秒”信息为第 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 码元；“分”信息为第 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17 码元；“时”信息为第 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27 码元；第 5, 14, 24 码元为索引标志，宽度为 2ms。时、分、秒采用 BCD 码表示

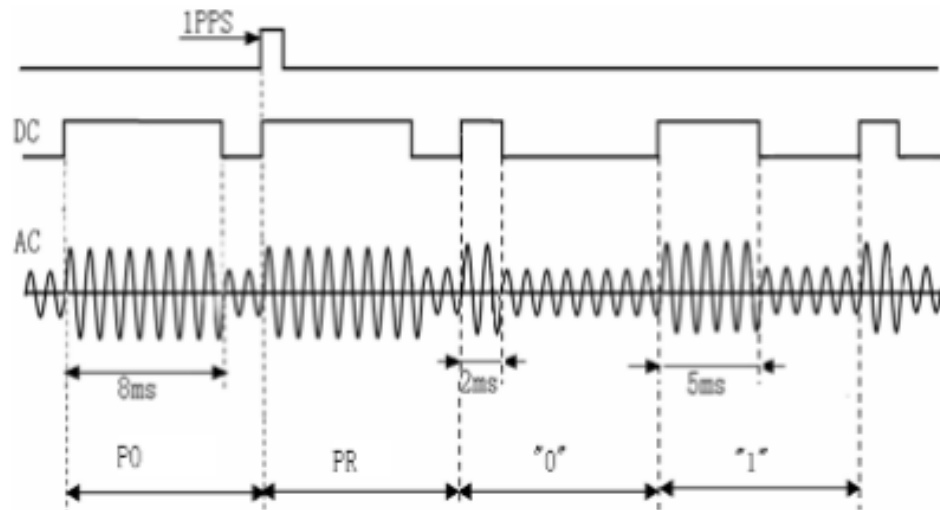


一个位置识别标志 P0 和相邻的参考码元 PR 组成了时帧的参考标志REF，宽度为 8ms；每帧包括 100 个码元，10 个码元为一个位置识别标志：P0 至 P9, 每个为 10ms。二进制“1”的脉宽为 5ms；“0”的脉宽为 2ms。

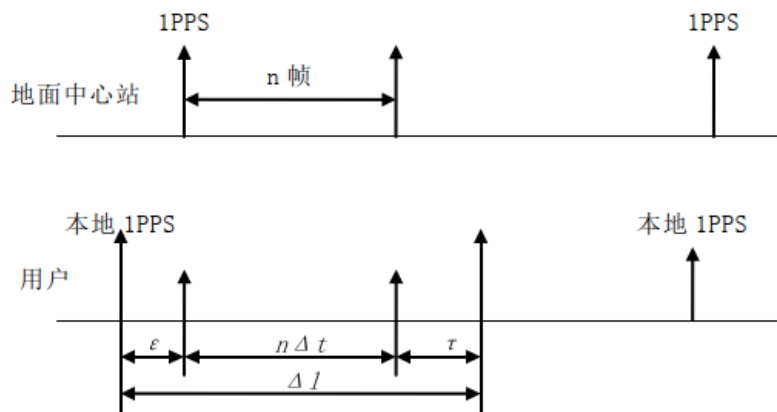


2.3.2 IRIG - B(AC)时间码

IRIG-B (AC) 与 IRIB-B (DC) 格式具有严格的对照关系。在交流码中，准时是每个周期脉冲的起始过零点，1 秒中有 1000 个码元，一个脉冲周期是一个码元。一个码元是 1ms，每 10 个码元相当于 DC 码中的一个码元。秒的开始是由连续两个高幅值的 8ms 脉冲串表明，每十个脉冲周期表示一个逻辑含义。二进制中的“0”和“1”都可用高幅值脉冲加低幅值脉冲串表示，其中，2 个高幅值的脉冲加 8 个低幅值的脉冲串表示“0”，8 个高幅值的脉冲加 2 个低赋值脉冲串表示“1”。



2.4 消息传输



单向授时中，从地面中心站发出信号到卫星并转发到用户，流程如左图

$$\Delta l = \varepsilon + n\Delta t + \tau$$

式中：

ε —— 钟差

$n\Delta t$ —— n 帧传输耗时, Δt 为确定值

τ —— 信号正向传输时延

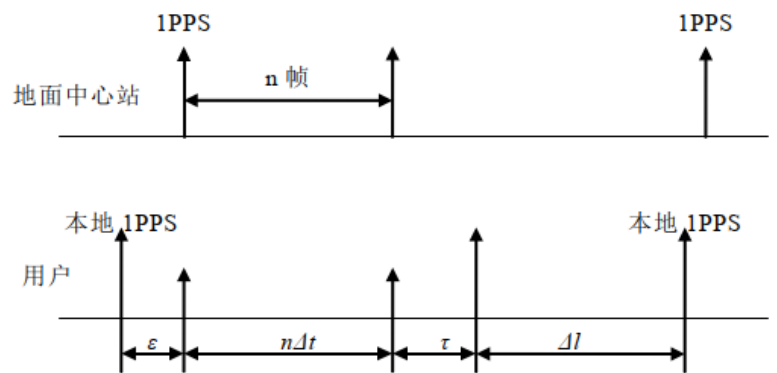
$$\tau = t_s + t_{rs} + t_{ru}$$

式中：

t_s —— 单向零值

t_{rs} —— 信号自地面中心传递到卫星的耗时

t_{ru} —— 信号从卫星至用户的耗时



双向授时中，用户接受到信息后还需向地面中心站返回信号，流程如左图

$$\Delta \varepsilon = \Delta x_1 - \tau - n\Delta t$$

式中：

$\Delta \varepsilon$ —— 用户时钟与地面控制系统的钟差

Δx_1 —— 终端实测值

Δx_2 —— 中控站测出信号的耗时

$n\Delta t$ —— n 帧传输耗时, Δt 为确定值

τ —— 正向传输时延

$$\tau = t_s + t_l = \Delta x_2 - t_d - t_r$$

式中：

t_s —— 单向零值

t_u —— 信号从地面中心站经卫星传至用户的耗时

t_d —— 地面中心站双向零值的均值

t_r —— 信号从用户经卫星至地面中心站耗时





中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

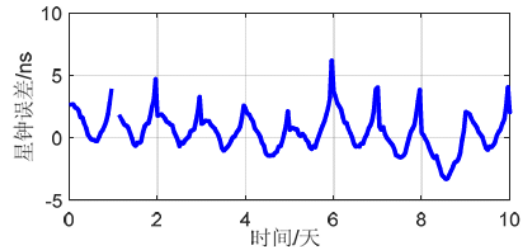
03

GNSS授时误差来源的分析 (以GPS为例)

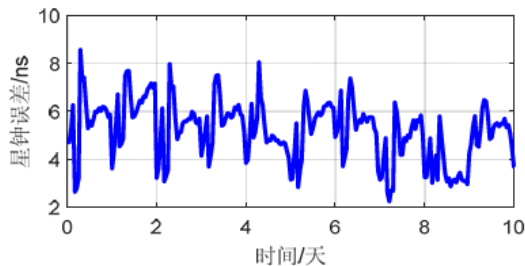


3.1 卫星方面误差

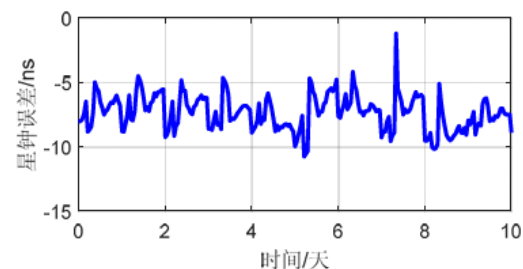
3.1.1 星钟误差



(a) GEO-3



(b) IGSO-7



(c) MEO-10

广播星历星钟误差在10天内变化情况

卫星导航系统定时定位测量精度与星载钟误差有一定的关系。为保证卫星时钟的高度统一，各导航卫星上均装备着多台高精度钟，但它们与标准时间仍存在一定的时间偏差和频率漂移，波动范围约为 $1\text{ms} \sim 0.1\text{ms}$ ，引起的等效距离误差在 $300\text{km} \sim 30\text{km}$ 。卫星钟差 Δt ，用 $\Delta t = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2$ 描述。

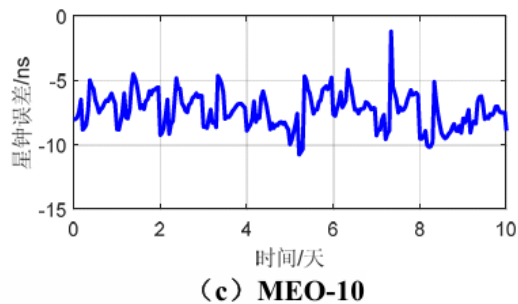
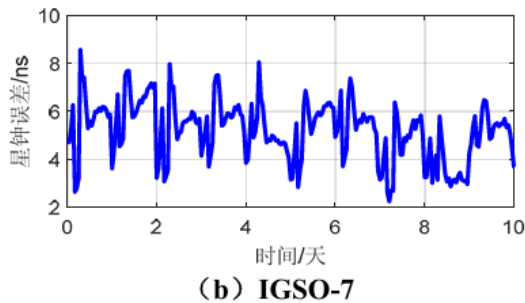
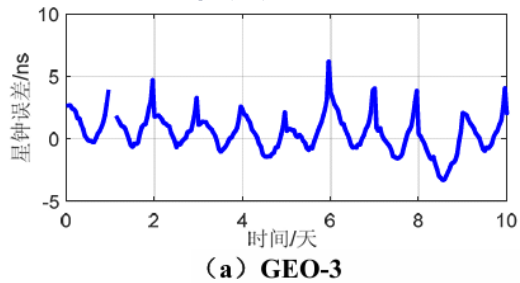
其中，三个二项式系数 a_{f0} a_{f1} a_{f2} 以及参考时间 t_{oc} 均由卫星导航电文的第一数据块给出。

各导航系统地面监测站经过测量，将以上述二阶多项式修正卫星时间，过修正，卫星钟与标准系统时间保持 20ns 以内的误差，等效距离误差在 6m 以内。



3.1 卫星方面误差

3.1.1 星钟误差



广播星历星钟误差在10天内变化情况

卫星时钟受狭义相对论效应和广义相对论效应的影响，其频率与地面静止钟相比，将发生频率偏移。所以卫星时钟总的校正量还应该包括相对论效应的校正量 Δt_r 。相对论效应校正量 Δt_r 的计算公式为

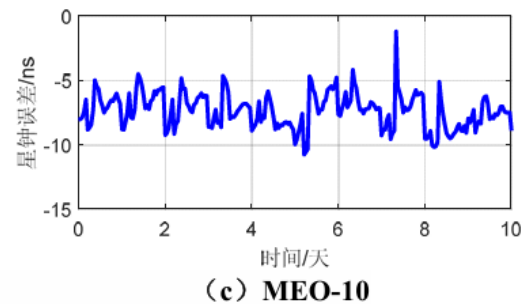
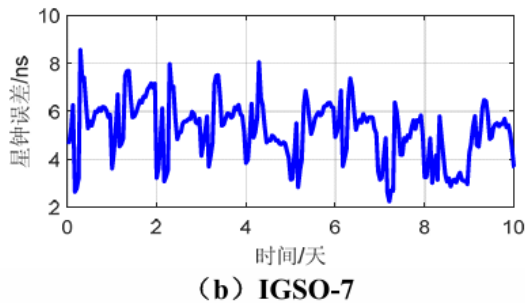
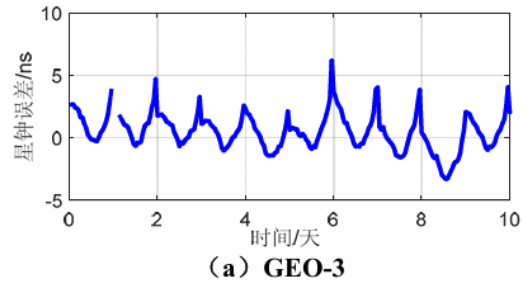
$$\Delta t_r = F e_s \sqrt{a_s} \sin E_k.$$

其中 e_s 为卫星轨道偏心率， a_s 为轨道长半径， E_k 为计算得到的偏近点角，常数 F 的值为 $F = \frac{-2\sqrt{\mu}}{c^2} = -4.442807633 \times 10^{-10} [s/m^{0.5}]$ 。 μ 和 c 为地球引力常数和光速。



3.1 卫星方面误差

3.1.2 星历误差



广播星历星钟误差在10天内变化情况

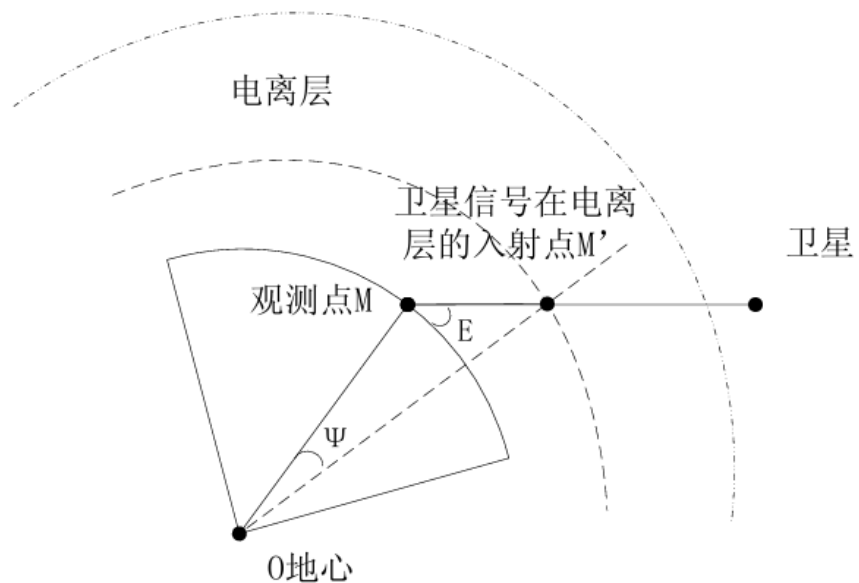
卫星导航系统地面监测站通过1个星历参考时间、6个开普勒轨道参数和9个开普勒轨道参数的摄动校正参数来预测卫星位置。卫星处于空间力场中，其实际位置和运行轨道不可能与星历参数描述的理想轨道和位置保持完全的统一，一部分的误差将反映到最终的定时定位精度中。

由16个星历参数描述、预估的卫星位置，与实际位置产生的误差可以用径向、横向、切向三个误差分量表示，径向误差处于卫星与地心连线的方向上，对地面设备提取的伪距产生较大影响，而其余两个分量在地面设备与卫星连线方向上的投影对伪距提取值的影响较小。尽管不同的导航系统使用卫星定位技术各不相同，但根据星历参数计算出的卫星位置所带来的误差的均方差基本都在5米以内，相应的距离测量误差通常小于1米。



3.2 信号传播方面误差

3.2.1 电离层对流层误差



电离层延时示意图

电离层位于50~1000公里的区域，受太阳辐射影响，造成导航信号传播延时。该介质对伪码产生负面效应，延长距离值；而对载波则有促进作用，缩短距离值。这解释了伪距测量与载波相位测量中的电离层误差处理差异。日间正午电离层对信号影响可达150米，夜间影响小于5米，太阳黑子活动时误差可增大。不同频率信号传播速度不同，双频接收可通过比较伪距值修正电离层误差，达到厘米级精度。单频接收机通常通过电离层模型估算延时误差，ICD提供的模型可结合Klobuchar模型用于L1和B1I频点的电离层延时计算。



3.2 信号传播方面误差

3.2.1 电离层对流层误差

对GPS L1频点或北斗B1I频点来说, 电离层垂直延时模型为

$$I_z(t) = \begin{cases} 5 \times 10^{-9} + A_2 \cos\left[\frac{2\pi(t-50400)}{A_4}\right], & |t-50400| < A_4/4 \\ 5 \times 10^{-9} & , |t-50400| \geq A_4/4 \end{cases}$$

其中电离层延迟余弦函数幅度 A_2 与余弦函数的周期 A_4 计算如下

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n |\phi_M|^n, & A_2 \geq 0 \\ 0, & A_2 < 0 \end{cases} \quad A_4 = \begin{cases} 172800, & A_4 \geq 172800 \\ \sum_{n=0}^3 \beta_n |\phi_M|^n, & 172800 > A_4 \geq 72000 \\ 72000, & A_4 < 172800 \end{cases}$$

导航信号与电离层交点处的地理纬度 ϕ_M 和地理经度 λ_M 为

$$\phi_M = \arcsin(\sin \phi_u * \cos \psi + \cos \phi_u * \sin \psi * \cos A)$$

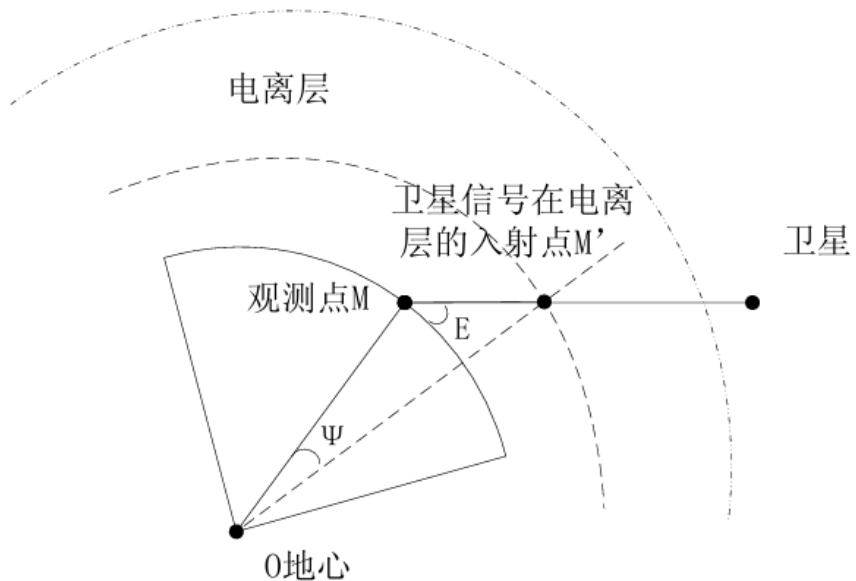
$$\lambda_M = \lambda_u + \arcsin\left(\frac{\sin \psi * \sin A}{\cos \phi_M}\right)$$

接收设备所处位置地理纬度 ϕ_u , 接收设备和信号射入交点的地心张角 ψ

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R}{R+h} * \cos E\right)$$

然后使用下述公式将电离层垂直方向延迟转换为导航信号传播方向上的电离层延时

$$I(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+h} * \cos E\right)^2}} * I_z(t)$$

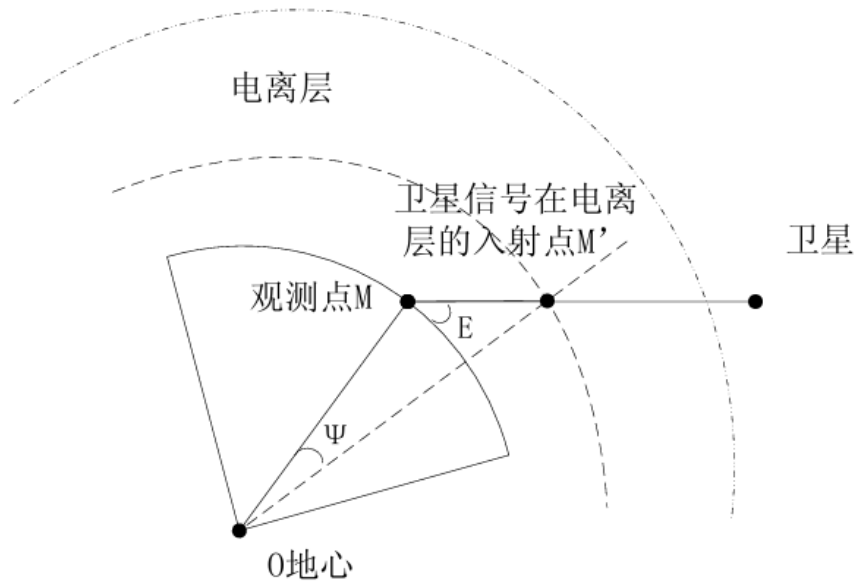


电离层延时示意图



3.2 信号传播方面误差

3.2.1 电离层对流层误差



电离层延时示意图

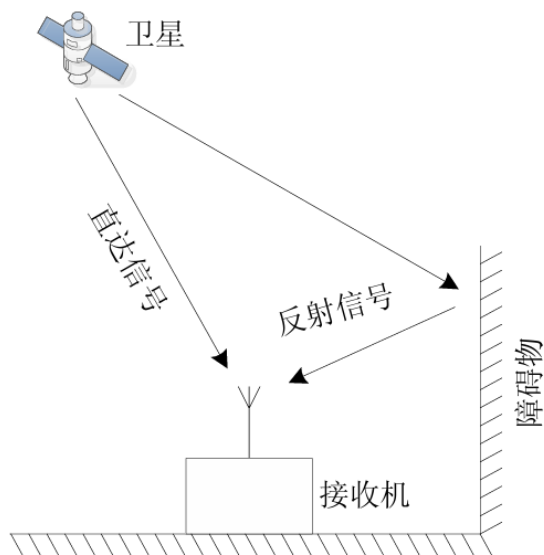
大气层底部距地面约40km的区域为对流层，其对导航信号的延时为信号传播误差的又一来源。由于地域环境和气候等不同，导致对流层延时误差模型也随地域和气候变动。导航卫星播发的电文中没有关于对流层延时的参数和修正模型，当前接收设备中普遍采用的误差模型为霍普菲尔德修正模型（Modify Hopfield），其程式为：

$$\begin{cases} \Delta\rho_{trop} = \frac{\eta_d K_d}{\sin(E^2 + 6.25)^{1/2}} + \frac{\eta_w K_w}{\sin(E^2 + 2.25)^{1/2}} \\ K_d = 1.552 \times 10^{-5} \frac{p_0}{T_{k0}} h_d \left(1 - \frac{h_u}{h_d}\right)^5 \\ K_w = 7.46512 \times 10^{-2} \frac{e}{T_k^2} h_w \left(1 - \frac{h_u}{h_w}\right)^5 \\ h_d = 40136 + 148.72(T_k - 273.16) \end{cases}$$

其中 T_{k0} 为海平面的标准绝对温度， T_k 表示观测设备处的绝对温度， t 为在观测设备可测得的当地空气的干湿度； h_w 表示对流层的湿分量 上限值，通常默认为11000； E 为观测设备和相应导航系统卫星之间的仰角； h_u 为观测点的海拔高度； η_d 和 η_w 分别表示为干分量和湿分量在对流层中的修正误差系数值。

3.2 信号传播方面误差

3.2.2 多径信号误差



多径环境示意图

多径现象指接收设备不仅接收到直接传播的导航信号，还会接收到经过周围物体反射或折射后的信号。反射信号通常比直线信号延迟到达。若反射信号延迟较大（超过一个伪码码片时间），对接收设备影响较小；但如果延迟较小，会导致接收信号与本地信号之间的相关性发生畸变，可能引起伪距和载波相位测量误差。

若接收设备收到卫星直达信号表示如 $s_d(t) = Ap(t) \sin(2\pi ft)$

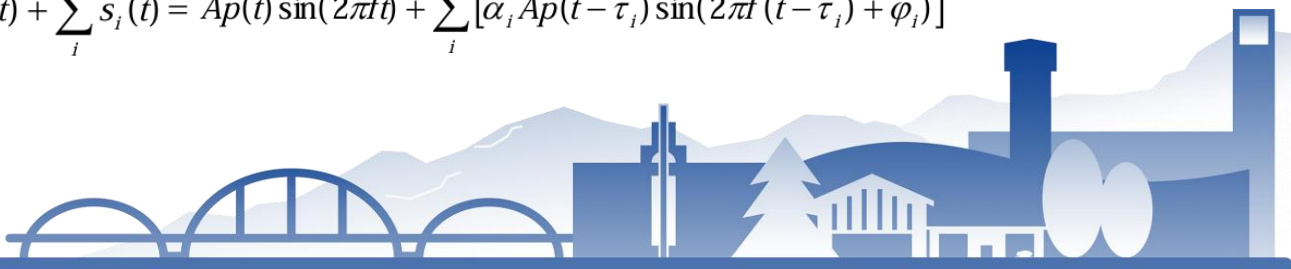
其中， A 为导航信号的幅度， $p(t)$ 为测距码与数据码的模二和， f 为导航信号的载波频率。此直达导航信号的第 i 个反射信号 $s_i(t)$ 可表达如下

$$s_i(t) = \alpha_i Ap(t - \tau_i) \sin(2\pi f(t - \tau_i) + \Delta\phi_i)$$

其中， α_i 为反射信号的衰减系数， τ_i 为反射信号相对于直达信号的延时， $\Delta\phi_i$ 是信号在反射前后的相位变化之和。反射信号相对于直达信号的总的相位变化 $\phi_i = \Delta\phi_i - 2\pi f\tau_i$

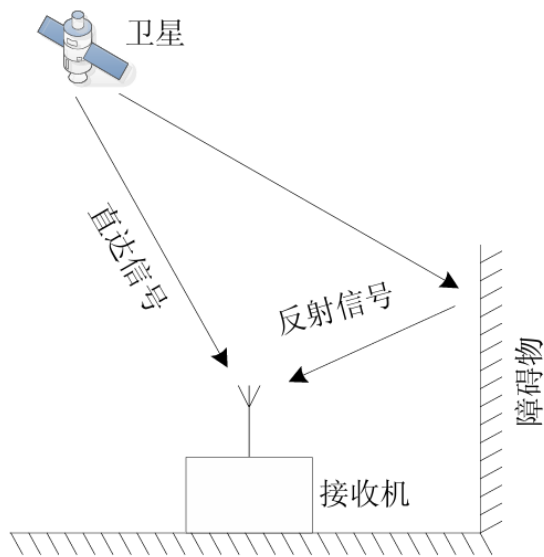
那么，接收设备检测接收到的总的信号应为卫星直达信号和各种反射信号综合后的信号，则进行多径效应分析采用的多径信号模型可表达如下

$$s(t) = s_d(t) + \sum_i s_i(t) = Ap(t) \sin(2\pi ft) + \sum_i [\alpha_i Ap(t - \tau_i) \sin(2\pi f(t - \tau_i) + \phi_i)]$$



3.2 信号传播方面误差

3.2.2 多径信号误差



多径环境示意图

多径信号抑制

在高山峡谷或城市街道中，接收设备容易受到导航信号的反射或折射波影响，导致定时定位精度下降。其由反射或折射后的卫星信号与直达信号组成，对伪距和载波相位测量产生影响。若多径信号的延时超过一个伪码码片时间，通常不会影响接收设备对直达信号的跟踪；但若延迟小于一个码片长度，相关运算将不再精确，导致跟踪误差。为抑制多径干扰，接收设备可以采取天线设计和信号处理技术两方面的措施。

天线设计方面，可使用右旋圆极化天线来拒绝接收奇数次反射的左旋圆极化干扰信号，同时设计低增益天线来抑制低仰角卫星信号。对于无法选址的设备，可通过数字信号处理技术来消除多径干扰。信号处理方法分为估计多径信号参数并去除干扰信号和改进伪码跟踪环路和相关器设置，考虑到硬件资源和算法实现的难度，调整伪码跟踪环路和相关器设置来实现多径抑制较为合适。



3.3接收机误差



(a) M300 Pro单北斗接收机



(b) PD318多系统接收机

接收机实物图

电离与导航卫星装备多个昂贵的星载原子钟不同，民用接收设备上一般使用比较价格较低的石英晶体振荡器，相应的，其准确度和稳定性无法达到原子钟的精度。

接收设备使用石英晶体振荡器作为频率源，出于器件本身的局限性，该频率源与标准频率存在一定的频率偏差，即频率源的频率准确度的问题。频率准确度可用频率偏差 f_0 或者频率偏差率 F 来衡量，即

$$F = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0}$$

其中， f_0 即为接收设备中使用的标准频率； f 为频率源的实际工作频率。频率偏差率的值通常很小，一般在0.25ppm至200ppm之间。



3.3接收机误差



(a) M300 Pro单北斗接收机



(b) PD318多系统接收机

接收机实物图

时间或频率的稳定度同样也是衡量振荡器特性的一个参数，指的是时间偏差或频率偏差在一段时间内能否保持不变，与前文所述的频率准确度并不相悖。频率稳定度通常用艾兰（Allan）均方差 $\sigma_A^2(\tau)$ 来衡量，定义如下：若 F_1, F_2, \dots, F_N 是时间上依次相距为 τ 的 N 个频率偏差率测量值，那么艾兰方差 $\sigma_A^2(\tau)$ 为

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{n=1}^{N-1} (F_{n+1} - F_n)^2$$



3.3接收机误差



(a) M300 Pro单北斗接收机



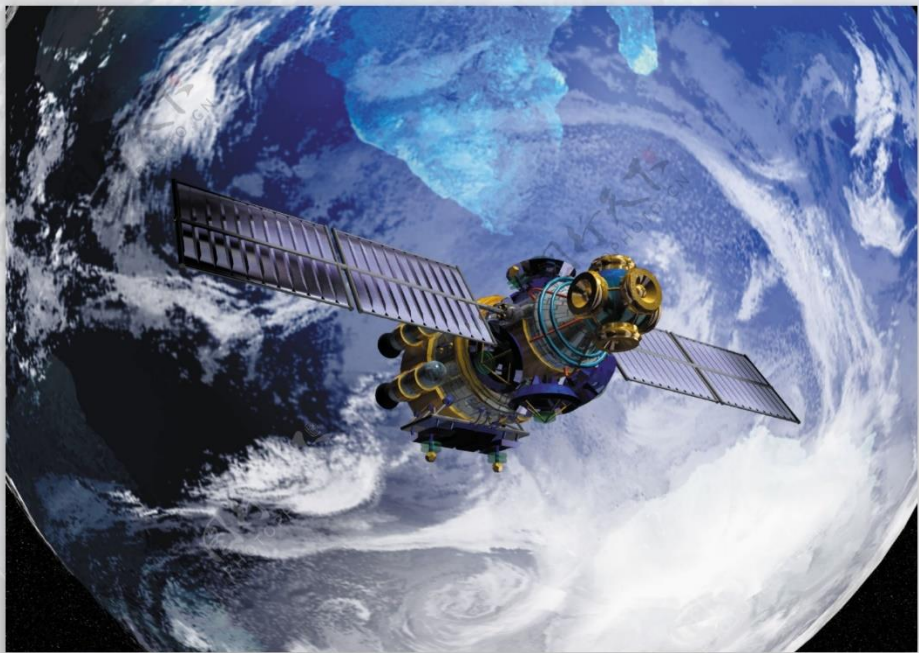
(b) PD318多系统接收机

接收机实物图

接收设备的其它误差主要包括算法误差、热噪声和天线引起的误差。热噪声来源于天线、低噪声放大器和射频前端器件。算法误差是指测距码信号和载波信号的观测精度导致的随机误差，增加观测量可减少其影响。距离提取量以天线相位中心为基准，实际环境中信号强度和输入角度的变化可能导致相位中心偏移，进而影响距离测量，表现为定时定位结果的偏差。该偏差一般较小，厘米级，普通定时定位中可忽略，但精密定位时仍需关注。



3.4其他误差



除去以上能够导致卫星授时误差的因素外，尚有其它误差来源。如地球自转带来的影响，卫星在围绕地球运转的同时对地面发射导航信号，而在此时，地球自身也在进行运转，相对于星历参数所描述的坐标，有了一定的误差，该误差反映到解算方程中的距离量中，约为厘米量级。

另外，地球不是孤立的存在于空间中，时刻受到来自其它天体的各种引力场的作用，导致地球自身的形状发生轻微的变化，而位于地球表面的接收设备在坐标系中的位置同样也会发生微小的变化，该变化反映在距离值的误差约为厘米量级。





中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

感谢观看
Thank you for watching

