doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.012

GPS 广播星历卫星位置解算与可见性预测

徐开俊，杨佳惠，赵　璐，杨　泳
（中国民用航空飞行学院飞行技术学院，四川 德阳 618300）

摘要：为实现对卫星位置快速解算及选择定位所需卫星，以满足对快速运动载体的定位需求，对 GPS 广播星历卫星位置解算与可见性预测进行研究。利用 IGS 数据中心下载的 GPS 广播星历，使用 Matlab 编程进行 GPS 广播星历读取与卫星历元的选择，更新计算所需的轨道参数；根据输入的用户位置进行可见性预测，将计算所得的卫星位置与思博伦卫星导航模拟器的卫星位置进行比较。结果表明：该算法绝对误差在 12 m 内，可满足快速定位中实际应用的需要。

关键词：GPS；星历读取；最佳历元选择；卫星位置解算；可见性预测
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**A

Satellite Position Solution and Visibility Prediction of GPS Broadcast Ephemeris

Xu Kaijun, Yang Jiahui, Zhao Lu, Yang Yong
(*College of Flight Technology*, *Civil Aviation Flight University of China*, *Deyang* 618300, *China*)

Abstract: In order to realize the fast calculation of satellite position and select the required satellite for positioning, and to meet the positioning needs of fast moving carriers, the GPS broadcast ephemeris satellite position calculation and visibility prediction are studied. Using the GPS broadcast ephemeris downloaded from IGS data center, Matlab programming is used to read the GPS broadcast ephemeris and select the satellite epoch, and update the orbit parameters required for calculation. According to the input user position, the visibility prediction is carried out, and the calculated satellite position is compared with the satellite position of Spirent satellite navigation simulator. The results show that the algorithm absolute error is within 12 m, which can meet the needs of practical application in rapid positioning.

Keywords: GPS; ephemeris reading; best epoch selection; satellite position solution; visibility prediction

0　引言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system，GNSS)中，空间交汇原理实现是卫星导航定位的基础，如何获得卫星概略位置与时间作为辅助信息是定位的前提。在实现定位技术时，需要通过广播星历获取卫星轨道信息计算来得到卫星位置[1]。

随着第三代 GPS 卫星的建设，导航定位精度的进一步提升，通过广播星历解算卫星位置有着方便、快速的优点。对于高速移动的载体，需要根据可见性条件实现快速、精确卫星位置解算，从而计算载体的相对位置和移动速度。

笔者基于 Matlab 实现 GPS 广播星历轨道参数的读取、解析并实现了卫星位置计算，为基于 GPS 导航系统的快速定位提供基础[1]。

1　GPS 星历数据解析

计算选择当天的 GPS 周内星历。GPS 广播星历由 IGS 下载，通过编程实现广播星历卫星轨道参数读取，解析数据后保存到结构体数组中，进行卫星位置的解算。具体的参数读取和解算实现流程如图 1 所示。

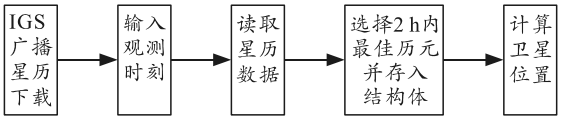

图 1　星历参数读取及位置解算

卫星参数通过播发导航电文的方式发送给用户，可根据已知的开普勒轨道模型实现对卫星实时位置的计算。采取 IGS 官网下载的广播星历数据，一个 *n* 文件对应当天 24 h 32 颗卫星每 2 h 播发一次的数据，其中包含卫星轨道参数信息。对数据进行读取、解码和解析便可解算卫星的实时位置。

1.1　广播星历数据格式

如图 2 所示，GPS 广播星历的文件头包含：文件版本号、文件类型、电离层参数、电离层校正参数和时间参数等信息。

收稿日期：2025-02-07；**修回日期：**2025-03-12
基金项目：2024 年度中央高校基本科研项目(24CAFUC04002)；民航飞行技术与飞行安全重点实验室项目(FZ2020KF09，FZ2021ZZ06)；大学生创新创业训练计划项目(S202410624122)
第一作者：徐开俊(1981—)，男，四川人，博士后。

```
     2                    NAVIGATION DATA                          RINEX VERSION / TYPE
CCRINEXN V1.6.0 UX   CDDIS            02-MAY-24  23:31     PGM / RUN BY / DATE
IGS  BROADCAST  EPHEMERIS  FILE                             COMMENT
     0.2235D-07  0.1490D-07  -0.1192D-06  -0.5960D-07        ION ALPHA
     0.1249D+06  0.6554D+05 -0.1966D+06   0.6554D+05        ION BETA
     0.279396772385D-08  0.799360577730D-14  405504  2312 DELTA-UTC: A0, A1, T, W
     18                                                     LEAP SECONDS
                                                            END  OF  HEADER
```

图 2　广播星历文件头示例

卫星的相关参数从第 9 行开始，每 8 行为一个数据块，每块具有相同的格式，每块在一个行开头多出来 3 位用于存放卫星号 PRN。接着每 19 位存放一个卫星轨道数据。因此可以将每个数据块视为 8 行 5 列的表格。

第 1 列第 1 行存放卫星号 PRN，第 1 列剩余位置全空。第 1 行依次是 toc(时钟时间，对应年月日时分秒)、a_0(卫星钟差)、a_1(卫星钟速)、a_2(卫星钟漂)。

第 2 行依次是 IODE(数据龄期)、Crs、Delta_n(由精密星历计算得到的卫星平均角速度与按给定参数计算所得的平均角度速度之差)、M_0(参考时刻的平近点角)。

第 3 行依次是 Cuc、e(轨道偏心率)、Cus、sqrt(A)(轨道长半轴的平方根)。

第 4 行依次是 toe(星历参考时刻)Cic、OMEGA(参考时刻的升交点赤经)、Cis。

第 5 行依次是 i_0(参考时刻的轨道倾角)、Crc、omega(近地点角距)、OMEGA_DOT(升交点赤经变化率)。

本次计算只取到第 6 行第 2 列 IDOT(轨道倾角变化率)。广播星历数据示例如图 3 所示。

```
 2  24  4  20  0  0  0.0     -0.450444873422D-03   0.648014975013D-11   0.000000000000D+00
   0.210000000000D+02   -0.631250000000D+01   0.437053919336D-08   0.322183333280D+00
  -0.461935997009D-06    0.160152559401D-01   0.105947256088D-04   0.515370501709D+04
   0.518400000000D+06   -0.115483999252D-06   0.268723003879D+01  -0.193715095520D-06
   0.967619553878D+00    0.184625000000D+03  -0.120107684713D+01  -0.817212611614D-08
  -0.703600736366D-10    0.100000000000D+01   0.231000000000D+04   0.000000000000D+00
   0.200000000000D+01    0.000000000000D+00  -0.176951289177D-07   0.210000000000D+02
   0.511218000000D+06    0.400000000000D+01   0.000000000000D+00   0.000000000000D+00
```

图 3　广播星历数据示例

1.2　星历解析流程

1.2.1　GPS 广播星历结构体

参考 RINEX2.0 导航文件的读取，设置星历数据的结构体 satellite 用于保存卫星相关轨道参数，进行卫星位置解算。对一天 24 h 的数据全部读取后存入结构体中。从星历数据的头文件读取电离层参数和电离层改正参数等，直到读取到头文件末尾结束。读取流程如图 4 所示。

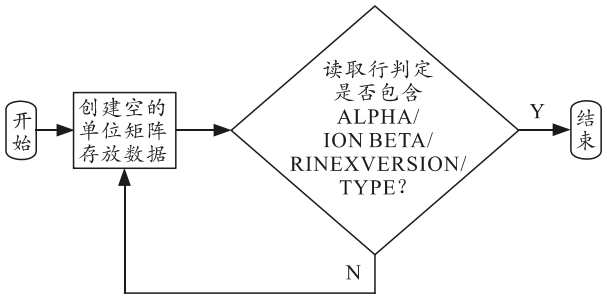

图 4　广播星历头文件读取流程

如图 5 所示，从开始的第 1 行卫星数据读取，依次读入卫星号，星历参考时刻，轨道根数。直到一天所有卫星数据全部读入。

```
satellite(i).PRN=str2double(strrep(stir(1:2),'',''));
satellite(i).Year=str2double(str(4:5));
satellite(i).Month=str2double(str(7:8));
satellite(i).Day=str2double(str(10:11));
satellite(i).Hour=str2double(str(13:14));
satellite(i).Minute=str2double(str(16:17));
satellite(i).Second=str2double(strrep(str(19:22),'','''));
satellite(i).a0=str2double(strrep(str:(23:41),'','''));
satellite(i).a1=str2double(strrep(str:(42:60),'','''));
satellite(i).a2=str2double(strrep(str(61:79),'','''));
satellite(i).IDOE=str2double(strrep(str(4:22),'','''));
satellite(i).Crs=str2double(strrep(str(23:41),'','''));
satellite(i).Delta_n=str2double(strrep(str(42:60),'','''));
satellite(i).M0=str2double(strrep(str(61:79),'','''));
satellite(i).Cuc=str2double(strrep(stir(4:22),'','''));
satellite(i).e=str2double(strrep(str(23:41),'','''));
satellite(i).Cus=str2double(strrep(stir(42:60),'','''));
satellite(i).sqrt_A=str2double(strrep(str(61:79),'','''));
satellite(i).toe=str2double(strrep(st;r(4:22),'','''));
satellite(i).Cic=str2double(strrep(str(23:41),'','''));
satellite(i).OMEGA=str2double(strrep(str(42:60),'','''));
satellite(i).Cis=str2double(strrep(str(61:79),'','''));
satellite(i).i0=str2double(strrep(str(4:22),'','''));
satellite(i).Crc=str2double(strrep(str(23:41),'','''));
satellite(i).omega=str2double(strrep(str(42:60),'','''));
satellite(i).OMEGADOT=str2double(strrep(str(61:79),'','''));
satellite(i).IDOT=str2double(strrep(str(4:22),'','''));
```

图 5　读取轨道参数

1.2.2　解析函数

读取数据时，识别星历文件的语句标识头是否 ENDOFHEADER，若是，则运行星历数据解析，按

文件中字符位置逐个识别数据读取，根据 1.1 节所示的星历数据格式读取各轨道参数，并存入星历的结构体中，供卫星位置计算读取调用。

2 GPS 卫星位置计算方法

2.1 广播星历轨道参数计算卫星位置

使用卫星轨道参数解算位置的过程中，由于观测时刻卫星钟参考时间为公历记法，即年、月、日、时、分、秒，而星历参考历元为 GPST 的周内秒计数，需要通过儒略历统一时间。通过编写 UTC 时转为 GPS 时来计算 GPS 周和秒。输入观测时刻后，通过选择与观测时刻相差不到 2 h 的广播星历数据作为最佳历元存入结构体 select 中，用于计算卫星位置。

GPS 卫星轨道计算时，由升交点赤经 Ω 与轨道倾角 i 确定轨道平面；由长半径 A 与椭圆偏心率 e 确定轨道形状；由近地点角距 ω 确定椭圆轨道的位置；由卫星过近地点时刻 t_0 确定卫星位置。

卫星位置计算的步骤为[2]：

1) 卫星运行平均角速度 n。

平均角速度 n_0 根据开普勒第三定律得：

$$n_0=\sqrt{GM/a^3}=\sqrt{u}\Big/\sqrt{a^3}\text{。} \tag{1}$$

式中 u=3.986×10$^{14}m^3/s^2$ 为 WGS−84 坐标系中地球引力参数。卫星运行平均角速度 n：

$$n=n_0+\Delta n\text{。} \tag{2}$$

式中：n_0 为平均角速度；Δn 为摄动改正数。

2) 规化时间 t_k。

观测时刻 t'钟差改正：

$$t=t'-\Delta t\text{；} \tag{3}$$

$$\Delta t=a_0+a_1(t'-t_{oc})+a_2(t'-t_{oc})^2\text{。} \tag{4}$$

将观测时刻 t 归化到 GPS 时系：

$$t_k=t-t_{oe}\text{。} \tag{5}$$

式中：t_{oe} 为参考时刻；t_k 为归化时间。

3) 观测时刻卫星平近点角 M_k：

$$M_k=M_0+nt_k\text{。} \tag{6}$$

式中 M_0 为 t_{oe} 时刻的平近点角。

4) 偏近点角 E_k：

$$E_k=M_0+e\sin E_k\text{。} \tag{7}$$

迭代法计算该值，首先令 $E_k=M_k$，求出 E_k 再代入式(7)计算。由于轨道的偏心率 e 小，收敛快，迭代 2 次即可求得该值。

5) 真近点角 V_k：

$$\cos V_k=(\cos E_k-e)/(1-e\cos E_k)\text{；} \tag{8}$$

$$\sin V_k=(\sqrt{1-e^2}\cdot\sin E_k)/(1-e\cos E_k)\text{；} \tag{9}$$

$$V_k=\arctan[(\sqrt{1-e^2}\cdot\sin E_k)/(\cos E_k-e)]\text{。} \tag{10}$$

6) 升交角距 ϕ_k：

$$\phi_k=V_k+\omega\text{。} \tag{11}$$

式中 ω 为星历中的近地点角距。

7) 摄动改正 δu、δr、δi：

$$\left.\begin{aligned}\delta u&=C_{uc}\cdot\cos(2\phi_k)+C_{us}\sin(2\phi_k)\\ \delta r&=C_{rc}\cdot\cos(2\phi_k)+C_{rs}\sin(2\phi_k)\\ \delta i&=C_{ic}\cdot\cos(2\phi_k)+C_{is}\sin(2\phi_k)\end{aligned}\right\}\text{。} \tag{12}$$

8) 经摄动改正后的升交距角 u_k、卫星矢径 r_k 和轨道倾角 i_k：

$$\left.\begin{aligned}u_k&=\phi_k+\delta u\\ r_k&=a(1-e\cos E_k)+\delta r\\ i_k&=i_0+\delta i+\dot{I}t_k\end{aligned}\right\}\text{。} \tag{13}$$

9) 卫星在轨道平面坐标系（X 轴指向升交点）的坐标[2]：

$$\left.\begin{aligned}x_k&=r_k\cos u_k\\ y_k&=r_k\sin u_k\end{aligned}\right\}\text{。} \tag{14}$$

10) 观测时刻升交点经度 Ω_k：

升交点经度 Ω_k 为观测时刻升交点赤经与格林尼治视恒星时（GAST）差值，GAST 为春分点和格林尼治起始子午线之间的角距。得：

$$\Omega_k=\Omega-\text{GAST}\text{；} \tag{15}$$

$$\Omega=\Omega_{oe}+\dot{\Omega}t_k\text{。} \tag{16}$$

式中：Ω_{oe} 为 t_{oe} 的升交点的赤经；$\dot{\Omega}$ 为升交点赤经的变化率，星历中每隔 1 h 更新 $\dot{\Omega}$ 和 t_{oe}。

星历参数中还有每周计时开始时刻 t_W 的格林尼治视恒星 GAST$_W$。由于地球自传效应，GAST 不断增加：

$$\text{GAST}=\text{GAST}_W+\omega_e t\text{。} \tag{17}$$

式中：地球自转角速度 ω_e=7.292 115 67×10^{-5} rad/s；t 为观测时刻[2]。

$$\Omega_k=\Omega_{oe}+\dot{\Omega}t_k-\text{GAST}_W-\omega_e t\text{；} \tag{18}$$

$$\Omega_k=\Omega_0+(\dot{\Omega}-\omega_e)t_k-\omega_e t_{oe}\text{。} \tag{19}$$

$\Omega_0=\Omega_{oe}-\text{GAST}_W$，$\Omega_0$、$\Omega$、$t_{oe}$ 从电文中获取。

11) 卫星在地心地固坐标系中的坐标[3]。

轨道直角坐标系中的坐标进行旋转变换得出卫星在地心地固坐标系中的 3 维坐标。

$$\begin{bmatrix}X_k\\ Y_k\\ Z_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_k\cos\Omega_k-y_k\cos i_k\sin\Omega_k\\ x_k\cos\Omega_k+y_k\cos i_k\sin\Omega_k\\ y_k\sin i_k\end{bmatrix}\text{。} \tag{20}$$

具体计算过程如图 6 所示。

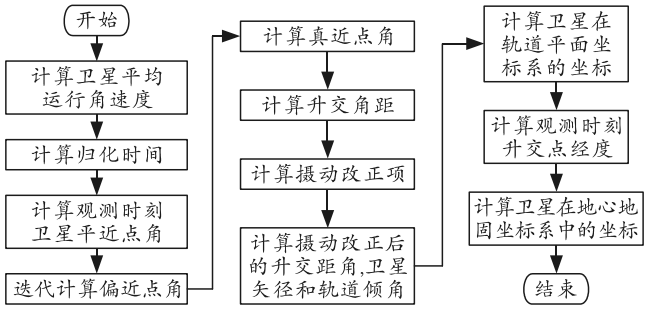

图 6　卫星位置计算过程

2.2　卫星可见性判断

定位时选星的卫星仰角不宜过低。低仰角卫星信号在传播路径中大气传播误差增大，导致观测精度降低，提高误差[4]。可见性判断时，设置最低仰角为 10°。将 ECEF 坐标转换为经纬高，计算得到卫星仰角和方位角。考虑信号传播过程中地球旋转，将测站坐标进行旋转改正。最后根据用户需要设置可见卫星仰角范围。根据观测点的轨迹数据获得当前时刻用户位置，可计算出当前观测点的可见卫星数目[5]。

1) 根据测站坐标与卫星坐标计算传播距离 ρ，进而计算出传播时间：

$$t=\rho/c。\tag{21}$$

需要改正的角度：

$$\varphi=t\times\omega。\tag{22}$$

2) 将测站坐标右乘一个旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$（相当于绕 z 轴旋转）：

$$\boldsymbol{R}_z(\varphi)=\begin{bmatrix}\cos\varphi & -\sin\varphi & 0\\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}。\tag{23}$$

3) 计算经旋转改正后的用户位置。

4) 将 ECEF 坐标系下卫星位置转换为以观测位置为参考点的 ENU 坐标系。

5) 仰角计算[5]：

$$\theta_k=\pi/2-\arccos\frac{x_m(X_k-x_m)+y_m(Y_k-y_m)+z_m(Z_k-z_m)}{\sqrt{x_m^2+y_m^2+z_m^2}\sqrt{(X_k-x_m)^2+(Y_k-y_m)^2+(Z_k-z_m)^2}}。\tag{24}$$

式中 θ_k 为第 k 颗卫星在 WGS-84 坐标系中的分量；(x_m, y_m, z_m)为(X_k, Y_k, Z_k)用户位置在 WGS-84 坐标系中的位置。

2.3　位置计算结果与 Spirent 结果比较

利用实验室的思博伦卫星信号模拟器作为信号源，验证上述方法的可用性[6-7]。Spirent 支持全星座全频点实时仿真。高性能 GNSS 模拟器具有灵活的软件定义平台和 API，支持所有的 GNSS 星座与波形，有超高的精度、分辨率和动态性能，模拟迭代率可达 1 000 Hz。设定观测位置，输出卫星位置坐标，与计算结果进行精度比较，评估结果的准确性。

2.3.1　观测位置测定与输入

对信号定位得到观测位置：纬度为 30.952 40°，经度为 104.308 488 2°，相对平均海平面的高度为 496.48 m。定位观测位置如图 7 所示。

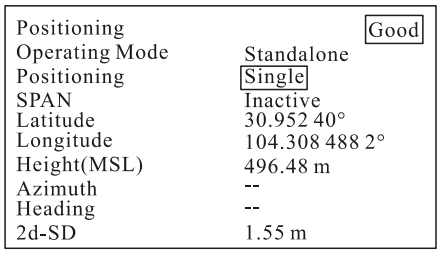

图 7　定位观测位置

将观测位置的经纬度及高度输入模拟器界面中，如图 8 所示。

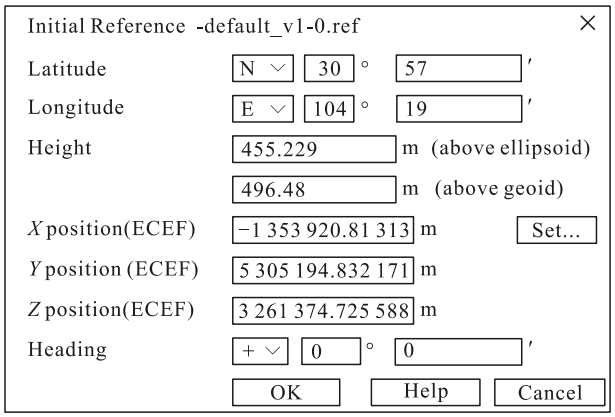

图 8　思博伦输入观测位置

位置设置结束后设置观测起始时间为 2024 年 5 月 1 日 12 时 0 分 0 秒，观测持续时长为 1 分 30 秒，观测结束时间为 2024 年 5 月 1 日 12 时 1 分 30 秒进行卫星观测。将精密星历导入思博伦后，如图 9 所示。

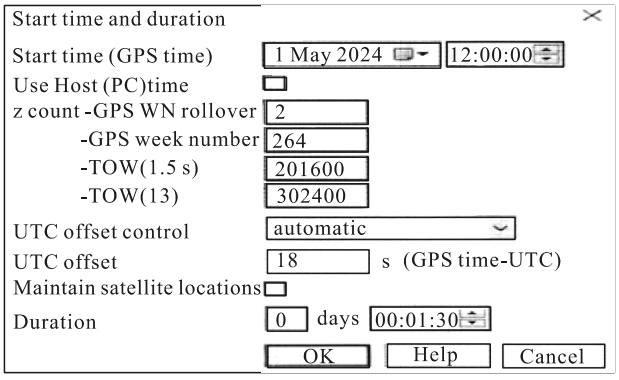

图 9　观测时间设置

输出数据包含信号通道、卫星号与其对应地心地固坐标值、卫星运行速度、方位角、仰角等数据。

2.3.2 位置计算结果

选取时间为 2024 年 5 月 1 日 12 时 0 分 0 秒至 12 时 1 分 30 秒卫星位置。部分结果如表 1 所示。

表 1 PRN 位置计算结果

位置	2			3		
	参考值	计算值	差值	参考值	计算值	差值
X	12 620 078.809 448 00	12 620 088.618 312 30	−9.808 864 30	1 341 415.203 802 95	1 341 421.040 905 27	−5.837 102 32
Y	21 017 307.168 571 30	21 017 301.873 015 80	−5.295 555 50	15 130 653.607 235 30	15 130 653.342 051 90	−0.265 183 40
Z	−9 373 382.348 824 38	−9 373 381.068 545 93	−1.280 278 45	21 952 936.789 506 10	21 952 936.618 472 70	−0.171 033 40
位置	13			14		
	参考值	计算值	差值	参考值	计算值	差值
X	13 254 176.530 040 90	13 254 181.542 772 90	5.012 732 00	22 379 855.654 444 70	22 379 849.968 092 60	−5.686 352 10
Y	11 538 356.625 005 90	11 538 352.389 323 10	4.235 682 80	13 471 842.022 921 90	13 471 851.944 401 60	9.921 479 70
Z	19 638 411.603 529 00	19 638 410.703 658 70	0.899 870 30	5 412 044.060 775 12	5 412 042.879 388 15	1.181 386 97
位置	22			23		
	参考值	计算值	差值	参考值	计算值	差值
X	24 227 267.753 491 30	24 227 263.260 435 50	−4.493 055 80	17 311 153.837 500 70	17 311 147.327 797 30	6.509 703 40
Y	10 131 411.568 927 10	10 131 422.319 226 60	10.750 299 50	15 453 875.912 158 30	15 453 883.675 982 80	−7.763 824 50
Z	−2 298 530.762 979 76	−2 298 530.740 214 74	−0.022 765 02	13 122 011.430 546 40	13 122 010.878 020 70	0.552 525 70

3 结束语

精密星历与广播星历差值受轨道的不确定性、信号传播的大气和电离层、接收设备误差影响。广播星历会包含一定程度的预测和模糊性。一般情况下精密星历与广播星历的差值范围在几米到数十米。

使用该程序和广播星历得到的卫星位置偏差在 12 m 内，计算仰角和方位角时由卫星高度在 20 000 km 以上，该偏差对可见性判断的影响可以忽略不计。在对飞机等快速移动的载体进行定位时满足实际应用误差要。在进行定位或导航应用时，应综合考虑差值范围并采取相应的纠正或修正措施，以确保系统的精度和可靠性。

1) 为 GPS 卫星定位提供可靠的卫星位置信息；2) 便于 Matlab 实现在接收机位置快速解算时的代码复用；3) 接收机利用历书信息估算卫星位置，用户可以主动搜索合适的卫星，避免了漫天搜星。

参考文献：

[1] 刘永强, 郭小伟, 杨喜兵. 北斗星历解析及实时卫星位置解算实现[J]. 现代导航, 2022, 13(2): 109−113.

[2] 杨锟. GNSS 接收机的检定及校准方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

[3] 袁海义, 周浚哲, 郝永平, 等. GPS 卫星可见性预测与接收机的快速定位[J]. 成组技术与生产现代化, 2014, 31(1): 45−49.

[4] 周欢. 基于 GPS 星历的卫星可见性研究与仿真[J]. 科技传播, 2022, 14(2): 135−138.

[5] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[6] 王鹏, 齐建中, 宋青平. GPS 历书解算与卫星可见性预测[C]//第十届中国卫星导航年会论文集——S02 导航与位置服务. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 北京市经济和信息化局, 北京市顺义区人民政府, 北方工业大学, 北京控制与电子技术研究所信息系统工程重点实验室, 2019: 6.

[7] 崔莹莹, 吕凌欧, 包亮, 等. GLONASS 历书解算与卫星可见性预测[J]. 航天控制, 2011, 29(6): 17−21.