

2024-2025 学年第二学期
武汉大学测绘学院导航工程专业

卫星导航原理实验报告

课程名称: 卫星导航原理

专业班级: 智能导航一班

姓 名: 秦旗峰

学 号: 2023302143029

实验名称: 广播星历解算及误差分析

实验时间: 2025.04

目录

1 实验目的.....	3
2 广播星历解算.....	3
2.1 文件格式.....	3
2.2 解算原理.....	3
2.2.1 所需数据.....	3
2.2.2 解算方法.....	4
3 编程解算.....	6
3.1 结构体定义.....	6
3.2 函数声明.....	6
4 实验结果与分析.....	6
4.1 卫星轨迹.....	6
4.2 误差分析.....	8
5 反思.....	10

1 实验目的

加深对广播星历内容的理解，编程解算广播星历得到 GPS 和 BDS 卫星位置并与精密星历对比，分析误差。

2 广播星历解算

2.1 文件格式

广播星历文件：brdm3350.19p，多星座混合星历

文件格式：广播星历文件包括文件头和数据体；文件头以“END OF HEADER”作为结束标志；

```
1      3.03      NAVIGATION DATA      M (Mixed)      RINEX VERSION / TYPE
2      BCEmerge      congo      20191202 004603 GMT PGM / RUN BY / DATE
3      Merged GPS/GLO/GAL/BDS/QZS/SBAS/IRNSS navigation file      COMMENT
4      based on CONGO and MGEX tracking data      COMMENT
5      DLR/GSOC: O. Montenbruck; P. Steigenberger      COMMENT
6      BDUT  2.7939677238e-09-9.769962617e-15      14 2081      TIME SYSTEM CORR
7      GAUT  9.3132257462e-10-8.881784197e-16 518400 2081      TIME SYSTEM CORR
8      GPGA  2.3574102670e-09 8.881784197e-16      0 2082      TIME SYSTEM CORR
9      QZUT  1.0244548321e-08 0.000000000e+00 180224 2082      TIME SYSTEM CORR
10     18
11     LEAP SECONDS
11     END OF HEADER
```

图 2.1 广播星历文件头

本实验所需数据为 GPS 和 BDS 星历数据，二者在形式上统一。

```
12     G01 2019 12 01 02 00 00-2.149520441890e-04-1.250555214938e-11 0.00000000000e+00
13     3.40000000000e+01-1.04750000000e+02 3.994452099249e-09-1.553221099630e+00
14     -5.379319190979e-06 9.166521602310e-03 5.785375833511e-06 5.153645725250e+03
15     7.20000000000e+03 1.564621925354e-07-7.586166362279e-02-6.891787052155e-08
16     9.783215501052e-01 2.765937500000e+02 7.636519973309e-01-7.854255732706e-09
17     -1.582208762489e-10 1.00000000000e+00 2.08200000000e+03 0.00000000000e+00
18     2.00000000000e+00 0.00000000000e+00 5.587935447693e-09 3.40000000000e+01
19     1.80000000000e+01
20
```

图 2.2 广播星历数据体

2.2 解算原理

2.2.1 所需数据

从星历文件中，我们可以读取到计算卫星位置需要用到的星历数据，包括：星历时间 toc 、卫星钟差 a_0 、卫星钟偏 a_1 、卫星钟偏移 a_2 、轨道半径正弦改正项 Crs 、角速度改正项 δn 、平近点角 M_0 、升交点角距余弦改正项 Cuc 、轨道偏心率 e 、升交点角距正弦改正项 Cus 、轨道半长轴平方根 \sqrt{A} 、周内秒 toe 、轨

道倾角余弦改正项 C_{ic} 、升交点赤经 ω_0 、轨道倾角正弦改正项 C_{is} 、轨道倾角 i_0 、轨道半径余弦改正项 C_{rc} 、近地点角距 ω 、升交点赤经变化率 ω_{dot} 、轨道倾角变化率 i_{dot} 。

其他参数包括：圆周率 π 、地球自转角速度 Ω_E 、地球引力常数 GM 。其中北斗系统与 GPS 系统的部分参数不同，加以前缀 BDS_区分。

2.2.2 解算方法

• 时间解算

首先根据广播星历中给出的 toc 转化为参考时刻周内秒 t ，结合星历数据 toe 计算出规划时间：

$$tk = t - toe \quad (1)$$

• 计算卫星运动的平均角速度

根据广播星历给出参数 \sqrt{A} 计算参考时刻 toe 的平均角速度 n_0 ：

$$n_0 = \frac{\sqrt{GM}}{(\sqrt{A})^3} \quad (2)$$

然后根据角速度改正数 Δn 修正观测时刻卫星的平均角速度 n ：

$$n = n_0 + \Delta n \quad (3)$$

• 计算观测瞬间卫星的平近点角

$$M = M_0 + n \times tk \quad (4)$$

• 计算偏近点角

用弧度表示的开普勒方程为：

$$E_n = M + e \cdot \sin E_{n-1} \quad (5)$$

此处需要迭代解算偏近点角，初值设置为 $E_0 = M$ 。

• 计算真近点角和升交点角距

真近点角 f ：

$$f = \text{atan2}\left(\frac{\sqrt{1-e^2}\sin E}{\cos E - e}\right) \quad (6)$$

升交点角距 u' ：

$$u' = \omega + f \quad (7)$$

• 摄动改正项计算及改正

广播星给出了 6 个摄动参数，由此可以计算出升交点角距改正项 δ_u ，轨道半

径改正项 δ_r ，卫星轨道倾角改正项 δ_i ：

$$\begin{cases} \delta_u = C_{uc}\cos 2u' + C_{us}\sin 2u' \\ \delta_r = C_{rc}\cos 2u' + C_{rs}\sin 2u' \\ \delta_i = C_{ic}\cos 2u' + C_{is}\sin 2u' \end{cases} \quad (8)$$

对升交点角距、轨道半径和轨道倾角进行摄动改正：

$$\begin{cases} u = u' + \delta_u \\ r = A(1 - e\cos E) + \delta_r \\ i = i_0 + \delta_i + i_{dot} \cdot tk \end{cases} \quad (9)$$

• 计算升交点赤经

对于 GPS 卫星和北斗 IGSO 或 MEO 卫星，升交点赤经计算公式为：

$$\Omega = \omega_0 + (\omega_{dot} - \Omega_{MEGA_E})tk - \Omega_{MEGA_E} \cdot toe \quad (10)$$

而对于北斗的 GEO 卫星，计算公式为：

$$\Omega = \omega_0 + (\omega_{dot}) \cdot tk - \Omega_{MEGA_E} \cdot toe \quad (11)$$

• 计算卫星位置

对于 GPS 卫星和北斗 IGSO 或 MEO 卫星，卫星的 ECEF 坐标可以由下面的公式计算得到：

$$\begin{cases} X = \cos u \cdot r \cdot \cos \Omega - \sin u \cdot r \cdot \cos i \cdot \sin \Omega \\ Y = \cos u \cdot r \cdot \sin \Omega + \sin u \cdot r \cdot \cos i \cdot \cos \Omega \\ Z = \sin u \cdot r \cdot \sin i \end{cases} \quad (12)$$

GEO 卫星在式(12)的基础上可以由下面的公式计算得到：

$$\theta = -\frac{5}{180}\pi \quad (13)$$

$$p = \Omega_{MEGA_E} \cdot tk \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos p & \sin p & 0 \\ -\sin p & \cos p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} GEOX \\ GEOY \\ GEOZ \end{bmatrix} = \mathbf{R}_z \cdot \mathbf{R}_x \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (17)$$

3 编程解算

3.1 结构体定义

```
struct Ephemeris {
    string satellitename; //卫星名称
    int time; //时间
    int year, month, day, hour, minute, second; //年月日时分秒
    double a0; //钟差
    double a1; //钟漂
    double a2; //钟漂率

    double iode; //星历信息
    double Crs; //轨道半径正弦调和改正振幅
    double delta_n; //平均角速度改正数
    double M0; //参考时刻的平近点角

    double Cuc; //升交点角距余弦调和改正振幅
    double e; //轨道偏心率
    double Cus; //升交点角距正弦调和改正振幅
    double sqrt_A; //轨道长半轴的平方根

    double toe; //周内秒
    double Cic; //轨道倾角余弦调和改正振幅
    double omega0; //升交点赤经
    double Cis; //轨道倾角正弦调和改正振幅

    double i0; //轨道倾角
    double Crc; //轨道半径余弦调和改正振幅
    double omega; //近地点角距
    double omega_dot; //升交点赤经变化率

    double i_dot; //轨道倾角变化率
};

struct PreEph {
    string name; //卫星名称
    double x; //x坐标
    double y; //y坐标
    double z; //z坐标
    int time;
};

struct Satellite
{
    string satellitename;
    double x;
    double y;
    double z;
    int time;
};
```

图 3.1 结构体定义

3.2 函数声明

```
string ReadFile_Header(string filename); //读文件头
vector<Ephemeris> ReadFile_Data(string filename); //读文件数据
vector<PreEph> ReadFile_PreEph(string filename); //阅读精密星历
```

图 3.2 读取函数声明

```
vector<Satellite> Calculate(vector<Ephemeris> alldata); //解算卫星位置
```

图 3.2 解算函数声明

4 实验结果与分析

4.1 卫星轨迹

本实验,我们通过广播星历解算了一天中任意时刻(0~86400s)卫星的位置,精密星历则是通过样条插值,把一天中任意时刻的卫星位置插值得到。

经过实验发现,拉格朗日插值对于这种数据量较大的插值计算数据慢,效果不佳,因此选用样条插值。

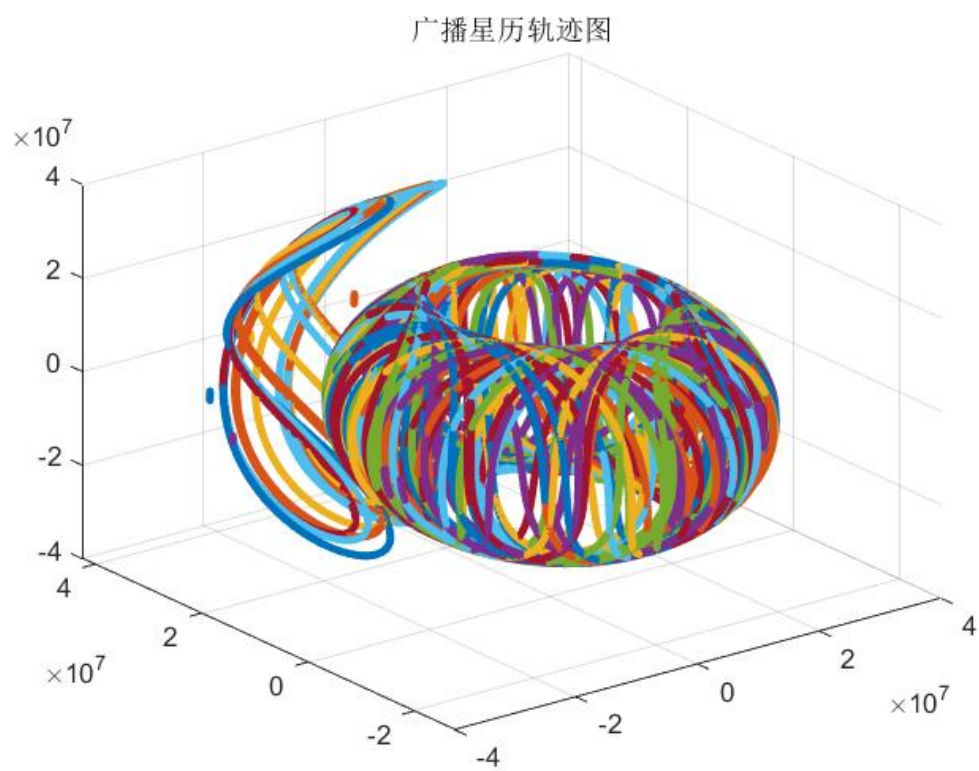


图 4.1 广播星历卫星轨迹图

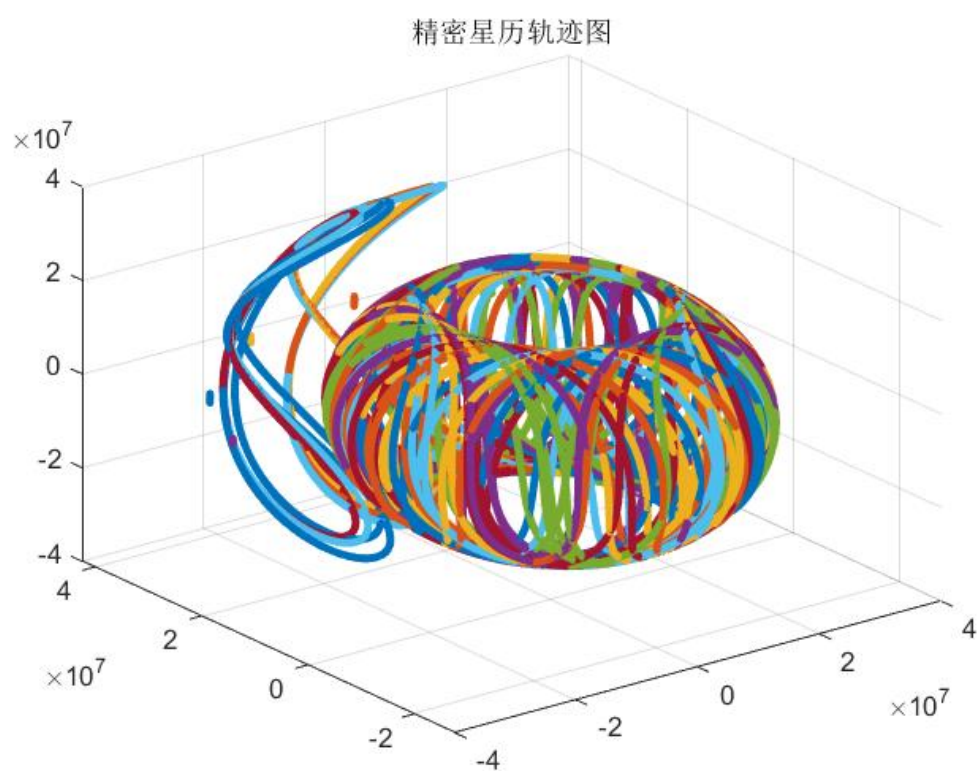


图 4.2 精密星历卫星轨迹图

4.2 误差分析

利用广播星历解算出卫星位置和精密星历相减可以得到广播星历在 XYZ 三个方向上的误差。

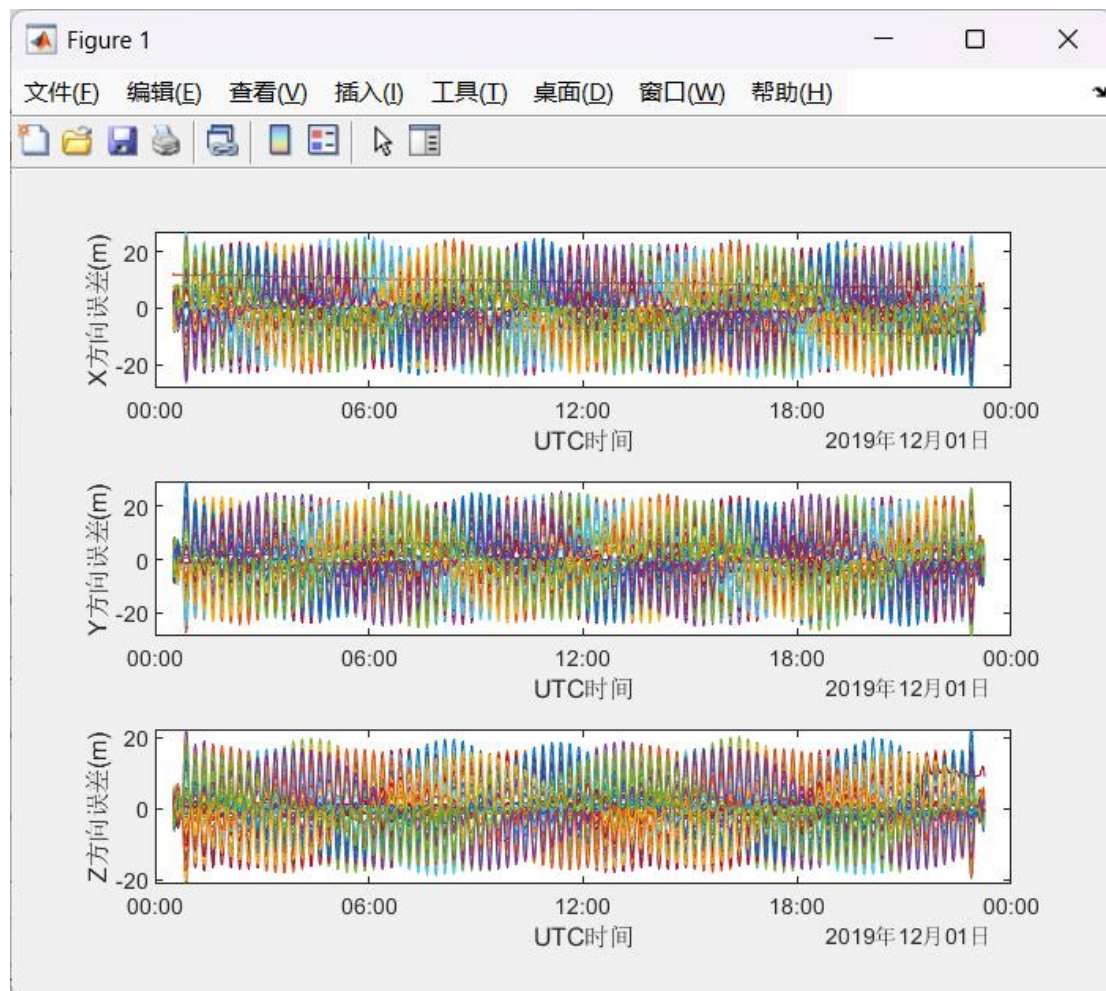


图 4.3 误差图

由误差图可以观察到误差呈现周期性特征,这是由于插值过程远离已知点时或广播星历外推时间较大时误差较大,但整体误差在 0m 上下震荡。

我们也可以通过绘图序列,观察特定卫星的误差变化情况。下图就是 C01~C05 的误差时序图,它们均为 GEO 卫星

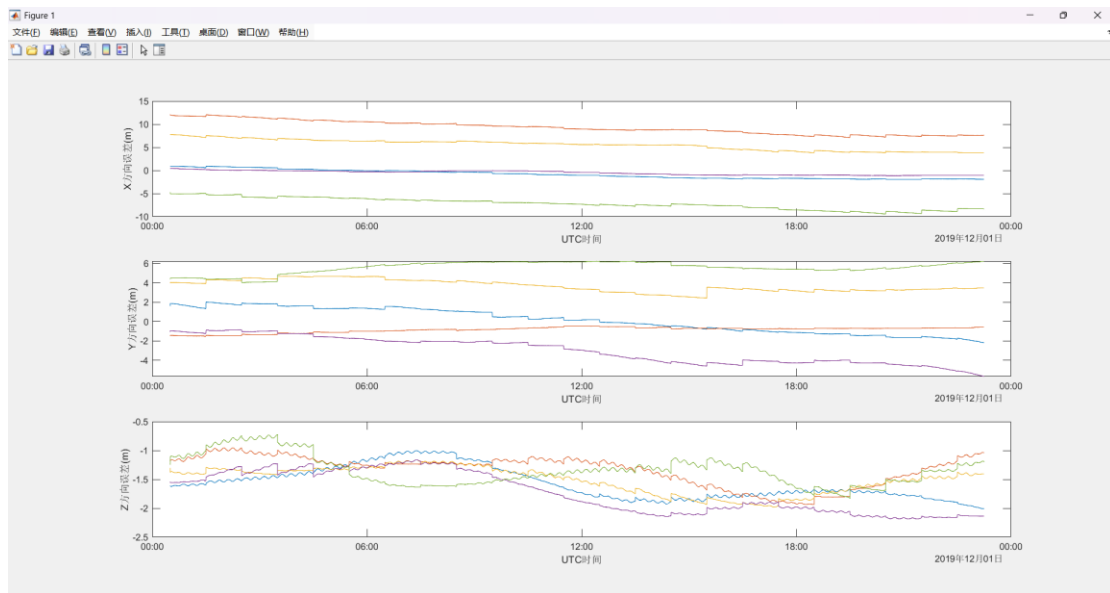


图 4.4 C01~C05 误差图

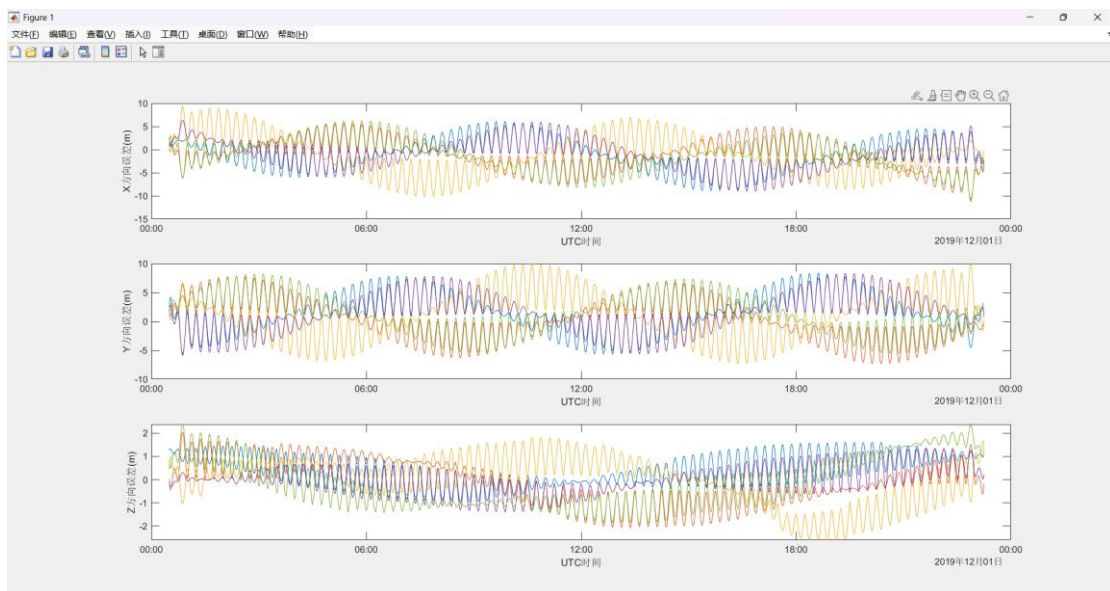


图 4.5 C06~C10 误差图

由于精密星历间隔为 15min，误差较小的点就处于精密星历有值的地方。我们同样也可以间隔 15min 画出误差时序图。

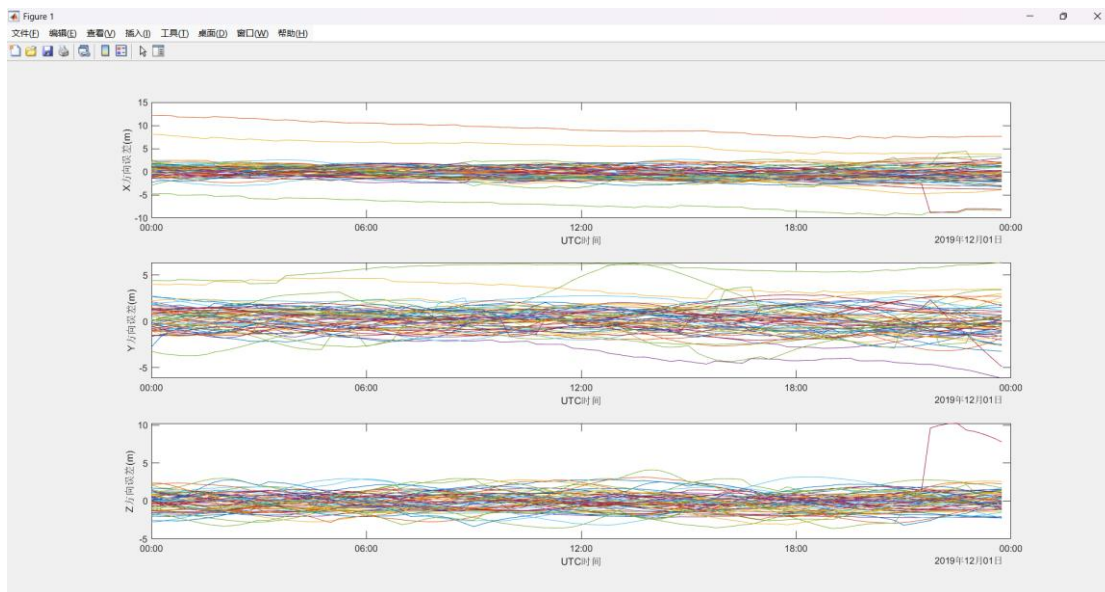


图 4.6 15min 间隔误差图

分析：广播星历与精密星历的误差差异主要源于数据生成方式和处理模型的复杂性。广播星历由卫星实时播发，依赖少量监测站数据和外推数学模型（如简化开普勒参数及摄动项），在轨道预测中因忽略高阶摄动力（如精确太阳光压、地球引力场细节）和钟差实时估计的局限性，导致米级误差；同时，其更新频率低、外推时间长会累积轨道偏差。

5 反思

这次实验利用广播星历解算了卫星位置，并依据精密星历分析广播星历误差时序图，加深了我们对星历数据结构和误差来源的理解。同时在编程解算的过程中挺高了我们编程能力和数据处理能力，为我们今后的专业学习打下坚实基础。