

第 19 章 电离层改正计算

(作者：李英冰、杨潘丰，主题分类：卫星导航)

电磁波信号在穿过电离层时，其传播速度会发生变化，变化程度主要取决于电离层中的电子密度和信号频率；其传播路径也会略微弯曲，从而使得信号的传播时间乘上真空中的光速所得到的距离不等于从信号源至接收机的几何距离，因此必须仔细加以改正。电离层延迟改正有经验改正、双频改正等方法。其中电离层改正模型是描述电离层中的电子密度、离子密度、电子温度、离子温度、离子成分和总电子含量等参数的时空变化规律的一些数学公式。电离层改正模型示意图如图 19.1 所示。

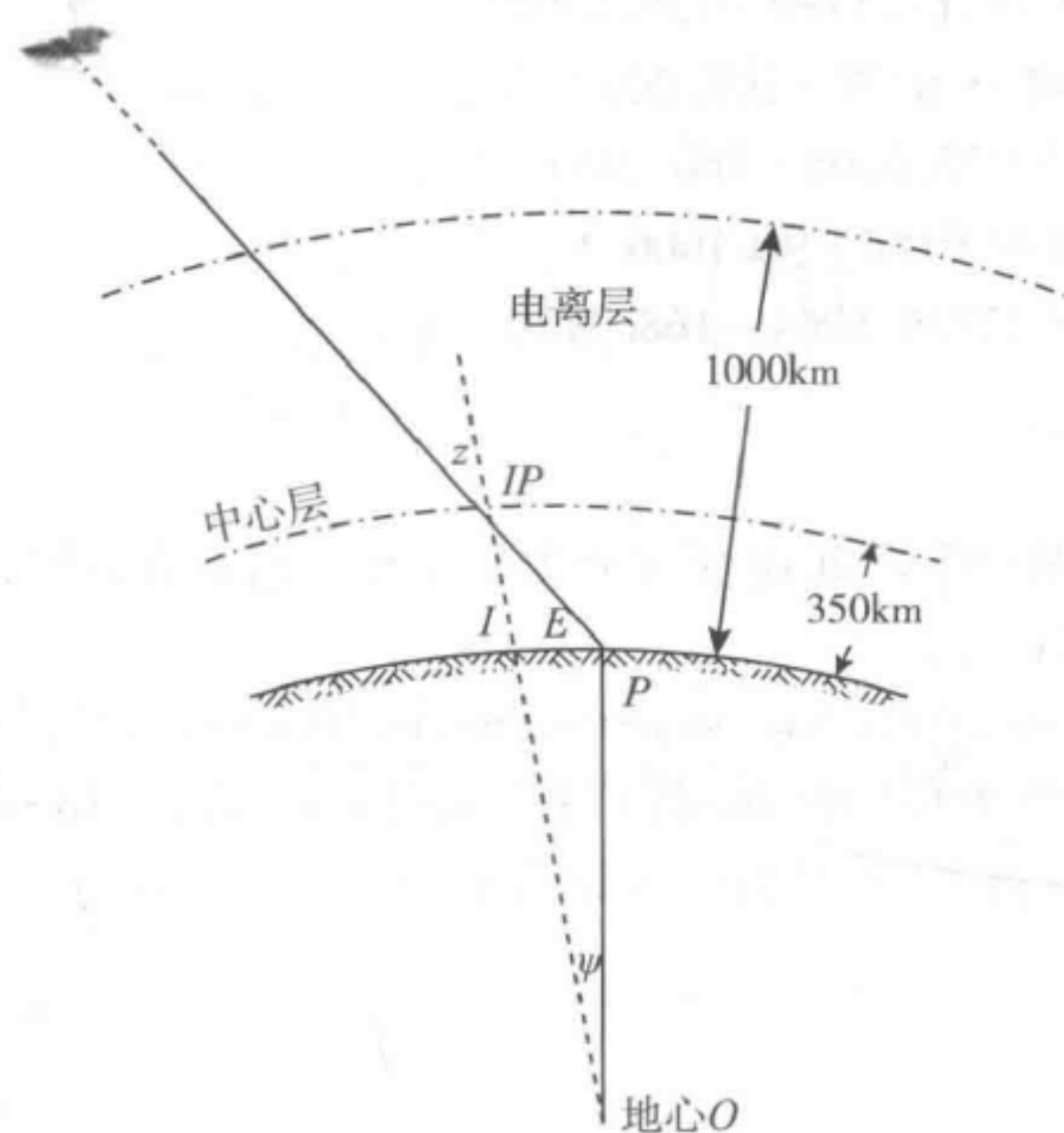


图 19.1 电离层改正模型示意图

一、数据文件读取

编写程序读取“卫星坐标数据.txt”文件，数据内容如表 19-1 所示。第 1 行是时间行，内容有年、月、日、时、分、秒组成，时间是世界时。第 2 行及其以后是卫星标识(第

1~3 列)、x 坐标分量(第 4~17 列,以千米为单位)、y 坐标分量(第 18~31 列,以千米为单位)、z 分量坐标(第 32~45 列,以千米为单位)。

表 19-1 数据内容

* 2016 8 16 10 45 0.00000000
G14 16687.643420 -12247.092346 -16288.201036
G13 -12561.283367 23101.321035 3911.534189
G20 10338.961864 21139.725738 12133.247989
.....
(详见“卫星坐标数据.txt”数据文件)

二、算法实现

1. 卫星高度角和方位角

设卫星 S 的地心坐标为(x_S, y_S, z_S),测站 P 的地心坐标为(x_P, y_P, z_P)。建立测站空间直角坐标系:原点位于测站 P, Z 轴与 P 点的椭球法线相重合, X 轴垂直于 Z 轴并指向椭球的短轴,而 Y 轴则垂直于 XPZ 平面向东,构成左手坐标系,如图 19.2 所示。

S 点的坐标(X, Y, Z)表示为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_p \cos L_p & -\sin B_p \sin L_p & \cos B_p \\ -\sin L_p & \cos L_p & 0 \\ \cos B_p \cos L_p & \cos B_p \sin L_p & \sin B_p \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

计算时测站 P 的地心坐标为(-2225669.7744, 4998936.1598, 3265908.9678),大地

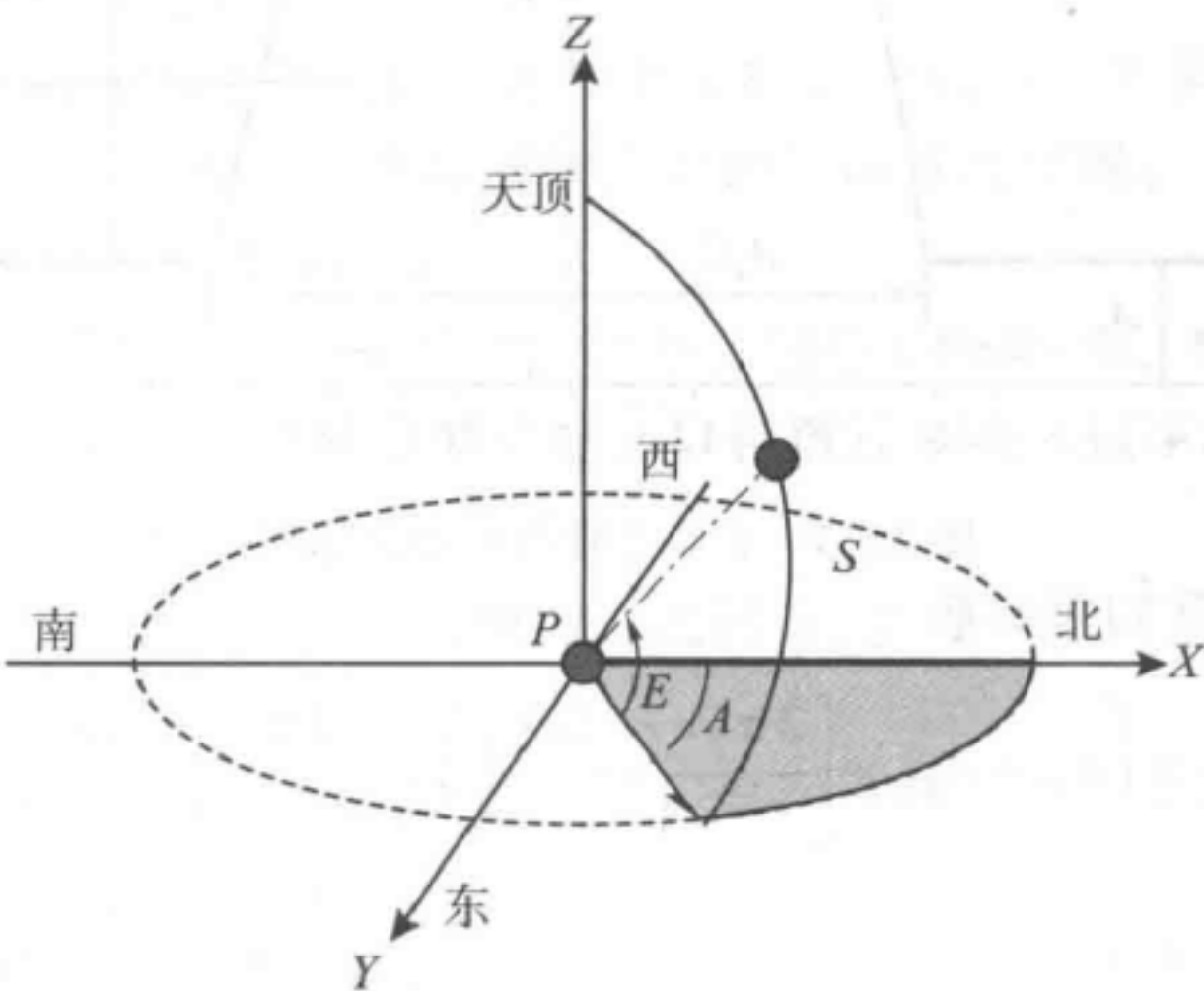


图 19.2 测站坐标系示意图

坐标 B_p 和 L_p 取值为 30 度和 114 度。

卫星 S 的高度角 E 和方位角 A 的计算公式为：

$$\begin{cases} A = \arctan \frac{Y}{X} \\ E = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \end{cases} \quad (2)$$

2. 穿刺点的地磁纬度

设穿刺点 IP 的高度 $H_I = 350\text{km}$ ，计算穿刺点 IP 的坐标为：

$$\begin{cases} \varphi_{IP} = B_p + \psi \cos A \\ \lambda_{IP} = L_p + \psi \sin A / \cos \varphi_{IP} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\psi = \frac{0.0137}{E + 0.11} - 0.022$ ，其中 E 以弧度为单位。

穿刺点 IP 的地磁纬度为

$$\varphi_m = \varphi_{IP} + 0.064 \cos(\lambda_{IP} - 1.617) \quad (4)$$

3. 计算电离层延迟量

克罗布歇模型改正示例如图 19.3 所示，L1 频率的电离层延迟时间为

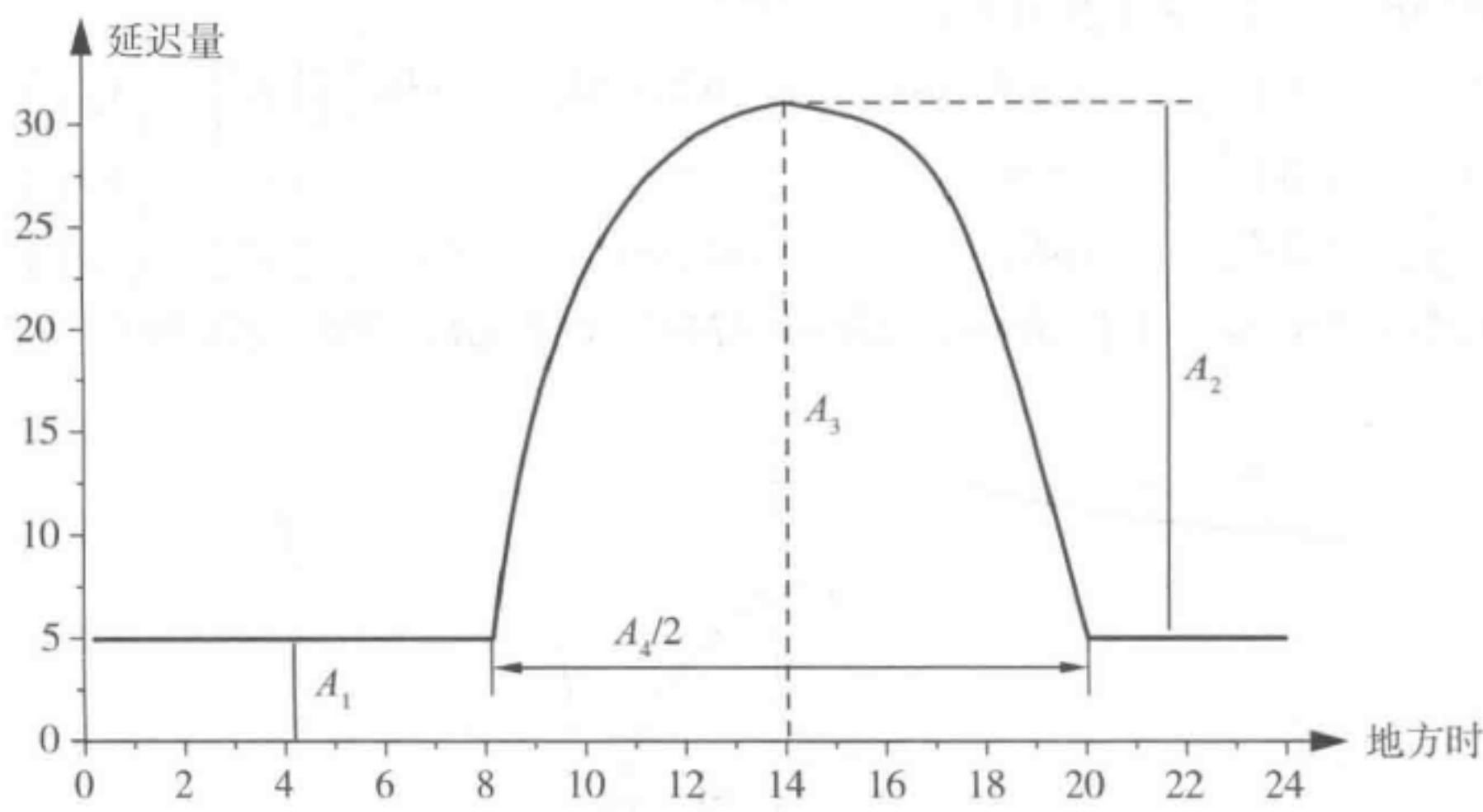


图 19.3 克罗布歇改正模型示例

$$T_{ion} = \begin{cases} F \times \left(A_1 + A_2 \cos \left[\frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right] \right), & \left| \frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right| < 1.57 \\ F \times A_1, & \left| \frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right| \geq 1.57 \end{cases} \quad (5)$$

式中， $F = 1 + 16 \times (0.53 - E)^3$ ， $A_1 = 5 \times 10^{-9}\text{s} = 5\text{ns}$ 是夜晚时间常量， $A_3 = 14\text{h} = 50400\text{s}$ 表

示取最大值时的当地时间。 $t = 43200\lambda_{JP} + T$, T 是观测时刻(观测时在一天中秒数, Second of Day)。 A_2 和 A_4 是多项式, 计算公式为:

$$\begin{cases} A_2 = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi_m + \alpha_2 (\varphi_m)^2 + \alpha_3 (\varphi_m)^3 \\ A_4 = \beta_0 + \beta_1 \varphi_m + \beta_2 (\varphi_m)^2 + \beta_3 (\varphi_m)^3 \end{cases} \quad (6)$$

在计算时, α_1 至 α_4 的取值为 $\{0.1397 \times 10^{-7}, -0.7451 \times 10^{-8}, -0.5960 \times 10^{-7}, 0.1192 \times 10^{-6}\}$, β_1 至 β_4 的取值为 $\{0.1270 \times 10^6, -0.1966 \times 10^6, 0.6554 \times 10^5, 0.2621 \times 10^6\}$ 。

距离延迟为

$$D_{ion} = T_{ion} \times c \quad (7)$$

其中 c 是光速, 用 299792458m/s 进行计算。

三、计算结果报告

输出每颗卫星的高度角、方位角, 以及电离层延迟(当高度角小于 0 时, 取值为 0)。

四、源程序与参考答案

在“<https://github.com/ybli/bookcode/tree/master/Part1-ch10/>”目录下给出了参考源程序、测试数据和可执行文件。

1. 源程序

编程语言为 C#, 项目名称为 Iono。项目中主要包含以下类:

- (1) FileHelper.cs: 源文件读取, 以及计算结果输出;
- (2) DataEntity.cs: 定义数据实体, 包含 Time、Data 两个属性, 并将两者以字符串的形式输出;
- (3) Time.cs: 对时间的定义;
- (4) Point.cs: 点的基本数据结构, 包含卫星标识、X、Y、Z 坐标分量等信息;
- (5) Algo.cs: 克罗布歇模型计算电离层延迟的具体算法实现;
- (6) Position.cs: 坐标系统的定义;
- (7) DayTime.cs: 枚举多种不同的时间类型, 包括 GPSWeek, MJD 等;
- (8) EllipsoidModel.cs: 对椭球模型的定义, 包括长半轴、短半轴、扁率等参数;
- (9) WGS-84Ellipsoid.cs: 对 WGS-84 椭球的定义;
- (10) IonoModel.cs: 建立卫星传输模型, 包括 α 、 β 等参数以及分别对应于 L1、L2 的电离层改正值;
- (11) MiscMath.cs: 多种数学算法的实现, 包括 RSS、两者互换、计算得到除法的余数等;
- (12) TimeSystem.cs: 支持的时间系统列表;
- (13) Triple.cs: 提供三维向量的数学函数, 包括一些专门用于轨道跟踪的功能。

2. 测试数据计算结果

在“运行程序与数据”目录下，给出了“卫星轨道数据.txt”数据文件。图 19.4 是用户界面示例，用以显示打开文件的内容、计算成果(每颗卫星的高度角、方位角，以及延迟改正数等)和保存相关内容。

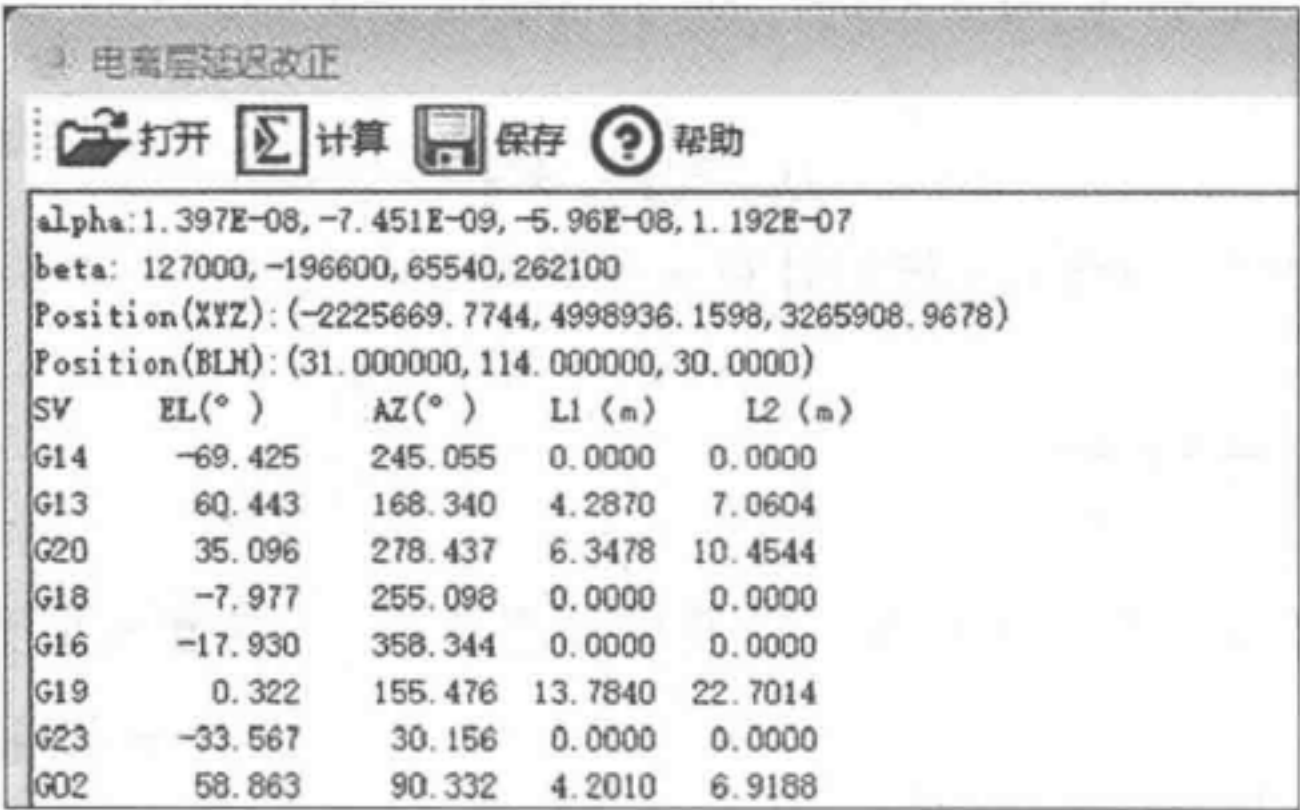


图 19.4 用户界面示例