

# 北斗监测数据在输电线路杆塔的位移和形变方面的监测与研究

武立平, 马维青, 杨海飞, 贾志义  
(国网阳泉供电公司, 山西 阳泉 045000)

**摘要:** 北斗定位系统是一个全球无线电导航系统, 由数十颗卫星组成, 每颗卫星位于地球上空 11000 海里的轨道上, 5 个地面站确保卫星正常工作; 这些卫星每个需要 12 个小时才能绕地球轨道运行; 北斗系统可以用于很多场合, 尤其是在地面目标形变检测方面, 独树一帜; 但是其存在着受空间及地球大气环境影响的问题, 导致精度不高; 为此, 文章对系统做了改进和研究; 最后有效消除各种主要影响因素, 达到了一定的效果。

**关键词:** 北斗; 输电线路杆塔; 紧凑型无线电导航接收器; 定位

## Monitoring and Research on Displacement and Deformation of Transmission Line Towers Based on Beidou Monitoring Data

Wu Liping, Ma Weiqing, Yang Haifei, Jia Zhiyi

(State Grid Yangquan Power Supply Company, Shanxi Yangquan 045000)

**Abstract:** In the past few years, compact radio navigation receiver has been widely used in civil market, usually in the name of Beidou or Global Positioning system (GPS). These commercial applications, which appeared as handheld devices or were built into cars, mobile phones and aircraft, originated from Cold War military applications. Beidou Positioning system is a global radio navigation system, consisting of dozens of satellites, each in orbit 11000 nautical miles above the earth, and five ground stations to ensure the normal operation of the satellite. Each of these satellites takes 12 hours to orbit the Earth.

**Keywords:** Beidou; transmission line tower; compact radio navigation receiver; positioning

### 0 引言

随着科学技术的飞速发展和进步, 变形监测的技术手段也随之越来越先进, 监测方法越来越多样化。而北斗卫星技术作为一种全新的现代空间定位技术, 已在诸多领域逐步取代了常规的传统测量方法。北斗卫星自动化检测系统具有速度快、全天候观测、自动化程度高、测点间无需通讯等优点, 能对各监测点进行同步变形监测, 并实现了数据采集、传输、处理、分析、显示、存储等的一体化和自动化, 测量精度可达 0.1 mm。

卫星遥感技术是运用合成孔径雷达干涉技术 InSAR 对大面积的滑坡、崩塌、泥石流以及地裂缝、地面沉降等地质灾害进行监测预报, 精度可达 1 mm, 是一项快速、经济的空间探测高新技术。目前, 随着合成孔径雷达技术研究的快速发展, InSAR 技术也慢慢变得成熟。

布设多个北斗卫星跟踪站阵列测得变形量来为地震预报提供信息。在这方面, 我国已建成国家地壳形变北斗卫星监测网、青藏高原地壳运动北斗卫星观测网、首都圈北斗卫星形变监测网。北斗卫星用于变形监测的主要方法有

静态测量和动态测量, 用于短距离的变形监测可达亚毫米级, 为大型建筑等高精度变形监测提供了一种新的手段。将北斗卫星用于变形监测有其相对于其他传统测量方法有着巨大的优势。

然而, 北斗卫星技术在变形监测中的应用也有其局限性和不足, 由于定位系统会有受到空间中各种干扰因素的问题, 本文着重研究了如何对其进行消除, 提高卫星形变检测的效率和精度。

### 1 检测核心技术

#### 1.1 北斗卫星中的误差来源及其改进措施

##### 1.1.1 误差来源及原因

北斗卫星定位误差来源大体可以分为卫星星历误差、卫星钟的钟误差电离层延迟等等。

在一个相当简化的方法中, 每个卫星发出的信号包括以下内容: 卫星  $X$ , 位置是  $Y$ , 这个信息是在时间  $Z$  发送的。为确定其在地球上的位置, 北斗卫星接收器将卫星发送信号的时间与接收信号的时间进行比较。根据该时间差, 可以计算接收器和卫星之间的距离。如果考虑来自其他卫星的数据, 则可以通过三边测量来计算当前位置 (意味着确定距三个点的距离)。这意味着至少需要三颗卫星来确定北斗卫星接收器在地球表面上的位置。从 3 个卫星信号计算位置称为 2D 位置定位 (二维位置确定)。它只是二维的,

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-08-29。

作者简介: 武立平(1965-), 男, 山西平遥人, 研究生, 高级工程师, 主要从事输变电及配电运检技术管理方向的研究。

因为接收器必须假设它位于地球表面上（在平面二维表面上）。借助于四个或更多个卫星，可以确定三维空间中的绝对位置。因此，3D 定位也可以使高度高于地球表面。要成功导航，接收器必须首先执行一系列操作。最初，它必须在相关性中获取卫星以进行跟踪。从冷启动开始，每个卫星可能需要几分钟。接下来，它必须跟踪一个导航消息的 30 秒长度没有误码的卫星，这可能需 1 分钟。出于安全目的，许多接收器获得连续的导航消息并比较它们的内容以确保准确的数据接收。此时，从代码到达时间开始，接收器可以估计由给定的伪距：

$$\rho_i = \rho_{Ti} + c(\delta_i^s - \delta_R) \quad (1)$$

$\rho_i$  表示为伪距， $\rho_{Ti}$  表示为真正的范围。伪距  $\rho_i$  包含两个主要的错误来源。两个错误来源是：(1) 不准确的接收器时钟错误 ( $\delta_R$ )，称为接收器时钟偏移；(2) 不准确的卫星接收信号错误 ( $\delta_i^s$ )。注意一个重要的属性  $\delta_R$ ，其中所有卫星信号和伪距都是相同的，因为它是接收机的属性。真正的范围  $\rho_{Ti}$  是从第  $i$  个卫星到接收器的距离。我们将卫星的位置表示为  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ，将接收器的位置表示为  $(X, Y, Z)$ 。回想一下，卫星位置是由接收器从导航消息中的星历表计算出来的。而方程的右侧包含  $X, Y, Z$  和的四个未知数  $\delta_R$ ，因此，要解决四个未知数，需要至少四颗卫星来产生四个方程。由于 Eq 为非线性的，通常这是使用多维 Newton-Raphson 方法和初始接收器位置 Parkinson<sup>[1]</sup> 的合理猜测来完成的。公式 (1) 作为解决方程的一种技术，是 Newton-Raphson 方法。初始猜测在  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ；其中存在以下恒等式：

$$X = X_0 + \Delta X \quad Y = Y_0 + \Delta Y \quad Z = Z_0 + \Delta Z$$

在上述恒等式中，其中  $X, Y, Z$  是真正的 ECEF 解决方案， $\Delta X, \Delta Y$  和  $\Delta Z$  是真实解决方案和初始猜测之间的差异。接收器 ECEF 坐标的初始猜测产生真实范围的初始猜测。要纠正我们需要计算的初始猜测  $\Delta X, \Delta Y$  和  $\Delta Z$ ，为了更新  $X_0, Y_0$  和  $Z_0$ 。这是通过线性（一阶泰勒）展开来完成的， $\rho_i$  在三个空间坐标中<sup>[2]</sup>，可以用以下等式来表示：

$$\rho_i - \rho_{Ti} - c\delta_i^s = \frac{\partial \rho_i}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} \Delta X + \frac{\partial \rho_i}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} \Delta Y + \frac{\partial \rho_i}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} \Delta Z - c\delta_R \quad (2)$$

解决方案  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  和  $\delta_R$  可以使用至少四个方程找到。

利用公式进行定义：

$$l = \begin{pmatrix} \rho_1 - c\delta_1 - \rho_{T1} \\ \rho_2 - c\delta_2 - \rho_{T2} \\ \rho_3 - c\delta_3 - \rho_{T3} \\ \rho_4 - c\delta_4 - \rho_{T4} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_1}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_1}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_2}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_2}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \\ \frac{\partial \rho_3}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_3}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_3}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \\ \frac{\partial \rho_4}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_4}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_4}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ c\delta_R \end{pmatrix} \quad (3)$$

使用这些定义，下面的公式 (4) 变成  $l = Ax$  与解决方案  $x = A^{-1}l$ 。解决后， $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  和  $\delta_R$  的校正的坐标被更新，以产生  $X, Y$  和  $Z$ 。当然，该解决方案是近似的，因此需要迭代方法，因此最近的解决方案成为初始猜测，并且重复上述过程直到获得期望的准确度。如果观察到超过四颗卫星，则问题是过度确定的，并且可以在最小二乘意义上解决以产生最佳接收器位置。

$$l = \begin{pmatrix} \rho_1 - c\delta_1 - \rho_{T1} \\ \rho_2 - c\delta_2 - \rho_{T2} \\ \vdots \\ \rho_i - c\delta_i - \rho_{Ti} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_1}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_1}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_2}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_2}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -1 \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial X} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_i}{\partial Y} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & \frac{\partial \rho_i}{\partial Z} \Big|_{X_0, Y_0, Z_0} & -1 \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ c\delta_R \end{pmatrix} \quad (4)$$

要计算导航错误，必须将测距错误映射到导航解决方案。该过程取决于接收器所看到的卫星几何形状。将测距解决方案映射到导航解决方案的因素称为精度稀释 (DOP)。从包含单位矢量  $A$  的设计矩阵计算 DOP。从设计矩阵计算  $Q$  矩阵：

$$Q = (A^T A)^{-1} \quad (5)$$

$Q$  矩阵将测距协方差矩阵映射到导航协方差矩阵中。在其最简单的形式中，它提供了从伪距误差到导航误差的比例因子。

$$x = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (6)$$

我们主要对  $Q$  的对角元素感兴趣。

$$Q = (A^T A)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{pmatrix} \quad (7)$$

在以下组合中：

$$\begin{aligned} \text{Metric} &\rightarrow \text{GDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44}} \\ \text{position} &\rightarrow \text{PDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \\ \text{horizontal} &\rightarrow \text{HDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22}} \\ \text{vertical} &\rightarrow \text{VDOP} = \sqrt{q_{33}} \\ \text{time} &\rightarrow \text{TDOP} = \sqrt{q_{44}} \end{aligned} \quad (8)$$

表1 星历参数和单位

No.	Parameter	Definition	Units
1	Crs	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Orbit Radius	meters
2	$\Delta n$	Mean Motion Difference From Computed Value	semi-circles/sec
3	M0	Mean Anomaly at Reference Time	semi-circles
4	Cuc	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Argument of Latitude	radians
5	e	Eccentricity	dimensionless
6	Cus	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Argument of Latitude	radians
7	$\sqrt{A}$	Square Root of the Semi-Major Axis	$\sqrt{meter}$
8	toe	Reference Time Ephemeris	seconds
9	Cic	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Angle of Inclination	radians
10	$\Omega_0$	2-31	semi-circles
11	Cis	Amplitude of the Sine Harmonic Correction Term to the Angle of Inclination	radians
12	Crc	Amplitude of the Cosine Harmonic Correction Term to the Orbit Radius	semi-circles
13	$\omega$	Argument of Perigee	meters
14	$\dot{\Omega}$	Rate of Right Ascension	semi-circles/sec
15	IDOT	Rate of Inclination Angle	semi-circles/sec

1.1.2 校正北斗卫星星历参数

纯椭圆开普勒轨道仅对于简单的两体问题是精确的, 其中两个物体之间的相互引力是唯一涉及的力。在实际的北斗卫星轨道中, 理想轨道存在许多扰动, 因此, 北斗卫星轨道被建模为修正的椭圆轨道, 其中包含校正项以解释这些扰动。

1) cos 扰动:

(1) 纬度的论证; (2) 轨道半径; (3) 倾斜角度。

2) 变化率:

(1) 正确的提升; (2) 倾角。

此外, 该模型的参数会定期更改, 以便最适合实际的卫星轨道。在正常操作中, 适合间隔为 4 小时。表 1 显示了星历模型参数。

表 2 通过解调和提取导航数据, 用户可以计算卫星位置与时间的关系。表 2 中等式给出了 WGS-84 地球中心地球固定参考系中的航天器天线相位中心位置。ECEF 坐标系定义为 WGS-84。

注意, 平均异常  $M_k$  随时间间隔线性变化。然而, 卫星位置的解决方案需要知道偏心异常  $E_k$ , 除非偏心率  $e = 0$ , 否则它不会随时间线性变化。必须通过迭代计算求解偏心异常  $E_k$ 。在这个项目中, Kepler 的 Eq 通过 Matlab 函数 fzero 和初始条件  $E_{k0} = M_k$  求解。t 也是传输时的北斗卫星时间; 即北斗卫星时间校正的传输时间。此外,  $t_k$  应该是时间 t 和纪元时间  $t_{oe}$  之间的实际总时间差, 并且必须考虑到周开始或结束时的交叉。也就是说, 如果  $t_k$  大于 302 400 秒, 则从 t 减去 604 800 秒。如果  $t_k$  小于 302 400 s, 则向  $t_k$  添加 604 800 s。

北斗卫星系统的设计尽可能准确。但是, 仍然存在错误。加在一起, 这些错误可能导致与实际北斗卫星接收器位

表 2

$t_k = t - t_{oe}$	星历参考时代的时间
$n = n_0 + \Delta n$	修正了平均运动
$M_k = M_0 + nt_k$	平均异常
$M_k = E_k - e \sin E_k$	开普勒的偏心异常方程(可以通过迭代求解)(弧度)
$\nu = a \tan 2 \left\{ \frac{\sin \nu}{\cos \nu} \right\} = a \tan 2 \left\{ \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E_k / (1 - e \cos E_k)}{(\cos E_k - e) / (1 - e \cos E_k)} \right\}$	真正的异常
$\varphi_k = \nu_k + \omega$	纬度的论证
$\begin{aligned} \delta u_k &= C_w \sin(2\varphi_k) + C_w \cos(2\varphi_k) \\ \delta r_k &= C_r \sin(2\varphi_k) + C_r \cos(2\varphi_k) \\ \delta i_k &= C_i \sin(2\varphi_k) + C_i \cos(2\varphi_k) \end{aligned}$	二次谐波扰动: 纬度校正的论证 半径校正 倾斜校正
$\begin{aligned} u_k &= \varphi_k + \delta u_k \\ r_k &= A(1 - e \cos E_k) + \delta r_k \\ i_k &= i_0 + \delta i_k + (IDOT)t_k \end{aligned}$	纠正了纬度的论点 纠正了倾向 校正半径
$\begin{aligned} x'_k &= r_k \cos u_k \\ y'_k &= r_k \sin u_k \end{aligned}$	位于轨道平面。
$\begin{aligned} \Omega_k &= \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e)t_k - \dot{\Omega}_e t_{oe} \\ x_k &= x'_k \cos \Omega_k - y'_k \cos i_k \sin \Omega_k \\ y_k &= x'_k \sin \Omega_k + y'_k \cos i_k \cos \Omega_k \end{aligned}$	修正了升序节点的经度。 地球固定坐标。
$z_k = y'_k \sin i_k$	

置相差 ±50~100 米。这些错误有几个来源, 其中最重要的错误将在下面讨论。

1) 大气条件: 电离层和对流层都折射北斗卫星信号。这导致电离层和对流层中北斗卫星信号的速度与空间中北斗卫星信号的速度不同。因此, 从“信号速度×时间”计算的对于通过电离层和对流层的北斗卫星信号路径部

分以及通过空间的部分将是不同的。

2) 星历误差/时钟漂移/测量噪声: 如前所述, 北斗卫星信号包含有关星历(轨道位置)误差的信息, 以及有关广播卫星的时钟漂移率的信息。有关星历误差的数据可能无法准确地模拟真实的卫星运动或精确的时钟漂移率。测量噪声对信号的失真会进一步增加位置误差。星历数据的差异会引入 1~5 米的位置误差, 时钟漂移差异会引入 0~1.5 米的位置误差, 测量噪声会引入 0~10 米的位置误差。

3) 多径: 在到达北斗卫星接收器天线之前从反射表面反射的北斗卫星信号被称为多径。由于很难完全校正多径误差, 即使在高精度北斗卫星单元中, 多径误差也是北斗卫星用户严重关注的问题。

如前所述, 说明了北斗卫星导航的主要关系, 但是由于不同的误差源, 真正的伪距不是直接可观察的, 而是必须用各种扰动来观察。由于不同的误差源, 测量的伪距等于真伪距加上各种扰动因子, 如下所示:

$$\rho_i = \rho_{Ti} + c(\delta_i^s - \delta_R) = \rho_{Ti} - c\delta_R + c(\Delta T_i + \Delta I_i + \Delta \nu_i + \Delta b_i) \quad (9)$$

在这个公式里:  $\Delta T_i$  是对流层错误;  $\Delta I_i$  电离层错误;  $\Delta \nu_i$  为相对论时间校正;  $\Delta b_i$  为卫星偏置时钟错误。

### 1.1.3 误差校正

#### 1) 电离层误差:

当北斗卫星卫星信号穿过电离层时, 它们会延迟与所遇到的自由离子数成比例的量。离子密度是当地时间, 磁纬度, 太阳黑子周期和其他因素的函数。

Klobuchar<sup>[1]</sup>开发了一个简单的电离层时间延迟分析模型, 我们将其用于电离层校正模型。这种形式的北斗卫星用户电离层校正算法需要用户的近似大地纬度  $\varphi_U$ , 经度  $\lambda_U$ , 每个北斗卫星卫星的仰角  $E$  和方位角  $A$ 。计算过程如下。

(1) 计算以地球为中心的角度  $\psi$ :

$$\psi = 0.0137/(E + 0.11) - 0.022 \text{ (semicircles)} \quad (10)$$

(2) 计算亚地球的纬度  $\varphi_I$ :

$$\varphi_I = \varphi_U + \psi \cos A \text{ (semicircles)} \quad (11)$$

如果  $\varphi_I \geq 0.416$ , 然后  $\varphi_I = 0.416$ 。如果  $\varphi_I \leq -0.416$ , 然后  $\varphi_I = -0.416$ 。

(3) 计算亚电层经度:

$$\lambda_I = \lambda_U + \left( \psi \frac{\sin A}{\cos \varphi_I} \right) \text{ (semicircles)} \quad (12)$$

(4) 找到地磁纬度  $\varphi_m$ , 朝向每个北斗卫星卫星的亚电离层位置。它被发现:

$$\varphi_m = \varphi_I + 0.064 \cos(\lambda_I - 1.617) \text{ (semicircles)} \quad (13)$$

(5) 找出亚电离层点的当地时间  $t$ :

$$t = 4.32 * 10^4 \lambda_I + \text{Time}_{GPS} \text{ (Second)} \quad (14)$$

如果  $t > 86400$ , 则使用  $t = t - 86400$ 。如果  $t < 0$ , 则添加 86400。

(6) 要转换为倾斜时间延迟, 请计算倾斜因子  $F$ :

$$F = 1 + 16(0.53 - E)^3 \quad (15)$$

(7) 通过首先计算  $x$  来计算电离层时间延迟  $T_{\text{消除电离}}$ :

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{\underbrace{\sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n}_{PER}} \quad (16)$$

如果  $PER < 72000$ , 则  $PER = 72000$ 。

(8) 如果  $|x| > 1.57$  然后:

$$T_{iono} = F \times (5 \times 10^{-9}) \quad (17)$$

除此以外:

$$T_{iono} = F \times \left[ 5 \times 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_m^n \times \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right] \quad (18)$$

#### 2) 对流层产生的影响:

对流层分析系统的主要目的是估算湿对流层延迟, 将其转换为综合水汽, 从而作为数值天气和气候模型的宝贵投入。因此, Hopfield 模型致力于对流层延迟建模和估算。霍普菲尔德将对流层延迟分为两部分: “干”的贡献和“湿”气氛的贡献。干组分的天顶延迟由下式给出:

$$K_d = 1.55208E - 4 \times P_{amb} \times (40136 + 148.72 \times T_{amb}) / (T_{amb} + 273.16) \quad (19)$$

式中,  $T_{amb}$  是环境温度,  $P_{amb}$  是环境空气压力。湿组分的天顶延迟由下式给出:

$$K_w = -0.282 \times \frac{P_{vap}}{(T_{amb} + 273.16)} + 8307.2 \times \frac{P_{vap}}{(T_{amb} + 273.16)^2} \quad (20)$$

将天顶延迟与其映射函数相乘以校正低于 90 度的高程。并添加组件以获得 SV 的对流层延迟校正:

$$\Delta T = \frac{K_d}{\sin(\sqrt{E}^2 + 1.904E - 3)} + \frac{K_w}{\sin(\sqrt{E}^2 + 0.6854E - 3)} \text{ (Meter)} \quad (21)$$

其中  $E$  是 Rad 的 SV 高程。

#### 3) 卫星时钟错误:

用户接收器需要纠正北斗卫星卫星时钟错误。用户接收器必须准确表示在从卫星  $i$  接收的北斗卫星信号发送时的北斗卫星系统时间。卫星时钟校正  $\Delta t_{sv}$  使用北斗卫星控制段上传后从卫星广播的系数获得。控制段实际上向卫星上传了几组不同的系数, 其中每组在给定时间段内有效。然后, 数据集在下行链路 `DataStream` 中以适当的时间间隔发送给用户。这些校正表示时间上的二阶多项式。

解决用户位置所需的北斗卫星时间是  $t = t_{sv} - \Delta t_{sv}$ ,  $t_{sv}$  SV 伪随机噪声码相位是发送时的时间, 卫星时钟校正项由多项式近似:

$$\Delta t_{sv} = af_0 + af_1(t - t_{oc}) + af_2(t - t_{oc})^2 + \Delta t_R - T_{gd} \quad (22)$$

式中,  $af_0$ ,  $af_1$  和  $af_2$  对应于相位误差, 频率误差和频率误差变化率的多项式校正系数; 相对论修正是  $\Delta t_R$ ;  $t_{oc}$  是时钟校正的参考时间,  $T_{gd}$  是群延迟。

相对论校正必须由用户计算。北斗卫星中描述的一阶效应给出了以地球为中心的地球固定 (ECEF) 观测器和偏

心率为  $e$  的北斗卫星卫星的相对论校正。这种相对论校正随着卫星偏心异常  $E_k$  的正弦变化如下:

$$\Delta t_R = Fe\sqrt{A}\sin(E_k) \quad (23)$$

其中:  $F$  为  $-4.442807633E-10$ s/m;  $E_k$  为卫星轨道的偏心异常;  $A$  为卫星轨道的半长轴。

最后通过仿真得到如图 1 所示的卫星态势图。

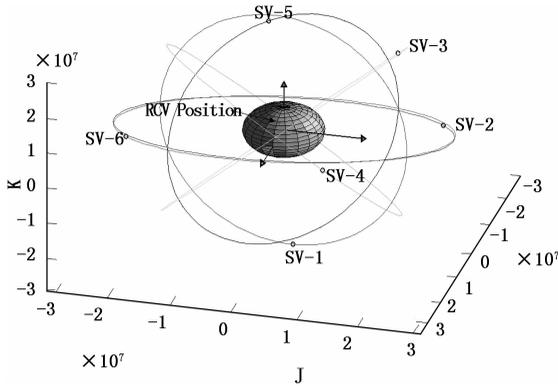


图 1 北斗卫星轨道位置图

### 1.1.4 卫星获取静态数据处理方法

以每一期测值作为一次相对定位, 通过计算两期之间监测点位置的变化来测定变形量。该方法中监测网由基准点和监测点构成, 基准点用于建立监测网的基准, 保证变形监测在同一基准下进行。采用该方法要正确剔除观测值中的粗差, 而且不受基准点的影响。对于如何剔除观测值中粗差, 国内外众多学者都进行了比较深入的研究, 主要是采用抗差估计来克服观测值中的粗差对参数估计的影响, 对粗差进行近于实际的估计, 该方法相对于传统的数据处理方法取得了良好的结果。对于如何判断基准点是否稳定, 可以使用秩亏自由网差、拟稳平常的方法来解决, 用这两种方法可以提高变性分析结果的准确性。

(3) 单历元解算方法: 首先确定北斗卫星的近似点坐标。后选择 PODP 值最小几何图形最优的 4 颗卫星为基本星座, 采用 L1 载波建立 3 个双差方程解算实数解, 对所有模糊度组合算出相应的坐标。其次, 根据计算的坐标、所有测站、L1、L2、观测值计算模糊度函数值, 对模糊度进行筛选以构建新的模糊度搜索空间, 最后, 根据双差方程, 采用最小二乘估计方法计算残差平方和, 再用 F 检验正确的模糊度。

(4) 谱分析法: 谱分析方法是时间域内的数据序列通过傅立叶级数转换到频率域内进行分析, 这样有利于确定时间序列的准确周期, 并判断隐蔽性和复杂性的周期数据。该方法在建筑物检测方面有较好的利用。但是, 该方法对数据序列的等时间间隔有苛刻的要求, 这一问题为实用性增加了难度。

### 1.1.5 北斗卫星输电线路杆塔的位移、形变方面的监测中的要点

如表 3 所示, 是北斗卫星输电线路杆塔的位移、形变方面的监测中的各个设备的技术要点。

表 3 北斗卫星输电线路杆塔的位移、形变方面的监测中的要点

通信方式	预留量	功能描述	备注	
北斗卫星天线接口	1	TNC 头	TNC	
2/3G 天线接口	1	2/3G 信号	SMA	
电源接口	1	IP65	LEMO 1B 大 2 芯	
RJ45 接口	1	有线网络传输	网线接口	
串口	RS232	1	设置, 电源, 调试, 小五芯通过按钮切换, USB 数据下载	LEMO 1B 大 8 芯, 设置或调试功能共用 3 芯, 通过按钮切换; 副电源 2 芯; 总共需要 7 芯。
串口	RS232/485	1	传感器输入、数据传输附加 PPS、事件触发、引脚	LEMO 1B 大 10 芯, 485 四芯与 232 复用、CAN 口 2 芯、PPS 一芯、事件触发 1 芯总共需要 8 芯。

## 2 结语

北斗卫星由于具有连续、实时、高精度、全天候测量和自动化程度高等优点, 在变形监测中得到了广泛的应用。北斗卫星应用于变形监测相对于传统的地面测量技术有其独特的优越性。但是由于施工工艺对形变监测工作提出了更快速、更高精度的要求。面对工程中的新形势、新要求, 传统监测方法显然已变得捉襟见肘, 利用北斗卫星等新技术、新手段研究出新的监测方法已变得非常必要, 相信北斗卫星技术将推动监测技术不断地向前发展。

### 参考文献:

- [1] Behrendt F, Kiefer C. Smart e-bike monitoring system: real-time open source and open hardware GPS assistance and sensor data for electrically-assisted bicycles [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10 (2): 79-88.
- [2] Shahini Shamsabadi S. Design and implementation of PAVE-MON: a GIS web-based pavement monitoring system based on large amounts of heterogeneous sensors data. [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2014.
- [3] Edge B, Velandia M, Boyer C, et al. Automatic Section Control Technologies and GPS Auto-guidance Systems Adoption in Cotton Production [J]. Journal of Agricultural Science, 2018, 10 (7).
- [4] Park C S, Park S. Fractional-N phase-locked loop for split and direct automatic frequency control in A-GPS [J]. International Journal of Electronics.
- [5] Pissardini R S, Junior E S F. Automatic Detection of Indoor and Outdoor Scenarios using NMEA Message Data from GPS Receivers [J]. 2018.
- [6] Huang J, Deng M, Tang J, et al. Automatic Generation of Road Maps from Low Quality GPS Trajectory Data via Structure Learning [J]. IEEE Access, 2018, 6: 71965-71975.