

# The Bridge Deformation Monitoring System Based on Difference Technology

Xiaoxin Huang<sup>1</sup>, Xuhui Tong<sup>1</sup>, Hailiang Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mathematics and Information Science, Zhejiang Ocean University, Zhoushan Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Key Laboratory for Ocean Big Data Mining and Applying, Zhejiang Ocean University, Zhoushan Zhejiang

Email: \*hlzhang88wy@163.com

Received: Jun. 20<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 9<sup>th</sup>, 2017; published: Jul. 12<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Firstly, this paper raises the Application background of the deformation monitoring system, secondly introduces the structure and operation principle of the deformation monitoring system for monitoring the bridge deformation, and then explains the pseudo range and carrier phase differential positioning technology which is used to locate the bridge, finally discusses how to control error during the process of measurement positioning.

## Keywords

Deformation Monitoring, Pseudo Range, Carrier Phase, The Differential Positioning, Error Control

---

# 基于差分技术的大桥变形监测系统

黄晓鑫<sup>1</sup>, 童旭辉<sup>1</sup>, 张海亮<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>浙江海洋大学数理与信息学院, 浙江 舟山

<sup>2</sup>浙江海洋大学, 浙江省海洋大数据挖掘与应用重点实验室, 浙江 舟山

Email: \*hlzhang88wy@163.com

收稿日期: 2017年6月20日; 录用日期: 2017年7月9日; 发布日期: 2017年7月12日

---

## 摘要

本文首先引出了大桥变形监测系统的实际背景, 其次介绍了对用于监测大桥变形的变形监测系统的构成及运行原理, 然后讲解了用于定位大桥的伪距与载波相位两种差分定位技术, 最后论述如何在测量定位

\*通讯作者。

过程中控制误差。

## 关键词

变形监测, 伪距, 载波相位, 差分定位, 误差控制

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来全国各地交通建设发展迅速, 交通运输量大幅增长, 使得桥梁在城市交通中的地位日渐上升。随着桥梁建设的增加和少量桥梁的超期超载服役, 不断发生垮桥、损桥事故, 造成人员伤亡和巨大经济损失[1], 故桥梁的定期变形监测和安全性评估显得极为重要。从早期桥梁破损的发现, 可以极大地降低桥梁的保养费用, 且可以避免因多次维修而封闭道路引起的经济损失, 并极大地降低事故发生率。

## 2. 变形监测系统[2]

### 2.1. 系统构成及运行原理

基于北斗卫星导航系统的桥梁扰度监测系统由监控中心、监测站和基准站一起构成, 各部分之间运用通信网进行数据传输。将北斗卫星接收设备布设在需被监测路段, 并将基准站设立在不容易发生沉降或变形的区域。基准站安置一台高精度接收机, 不间断地对测区内卫星实施监测, 并将监测数据和站坐标信息通过光纤网络实时发至监测站, 再利用监测站内的接收机接收卫星定位信号, 并利用光纤网络通信线路获取基准站所集的监测数据, 紧接着依据相对定位原理处理数据, 并给出测站厘米级精度的三维坐标, 通过无线网络将卫星数据传送至监测中心服务器进行实时解算。

桥梁安全监测系统运用多种高新技术, 包括结构分析计算、计算机技术、通信技术、传感器技术、网络技术、卫星导航等。其由数据采集层、数据传输层、数据中心层、分析应用层等四层架构构成(图 1)。

### 2.2. 数据采集层

数据采集层主要由北斗地基增强系统和北斗桥梁形变监测站构成。其中北斗地基增强系统主要构成有基准站、系统控制中心、用户数据中心等。北斗桥梁形变监测站主要由接收机、避雷设备、天线等构成。按照不同的布置位置。可将北斗桥梁形变监测站分为伸缩缝变位特征监测站、挠度监测站、桥墩不均匀沉降监测站等。数据传输层将数据采集层所集卫星原始数据发送至桥梁形变监控中心。

### 2.3. 数据传输层

数据传输层主要构成有桥梁形变监测应用网络、桥梁现场监测网络、电信运营商光纤宽带。

### 2.4. 数据中心层

数据中心层主要根据云计算环境来实时解算卫星数据和存储桥梁形变监测数据。卫星原始数据(载波相位和伪距)发至卫星数据实时解算软件后, 被实施差分处理和滤波, 桥梁形变监测数据存储内容包括原始数据、解算数据、预警数据与健康状态信息等。

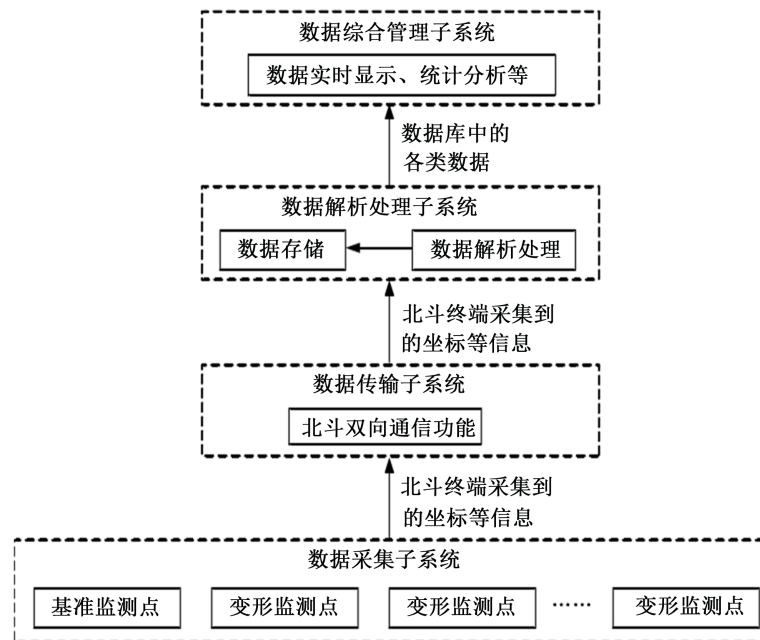


Figure 1. The principle diagram of the bridge safety monitoring system  
图 1. 桥梁安全监测系统原理图

## 2.5. 数据处理层

基于数据处理层，经平台搭建配置式开发，面向桥梁形变监测组建应用平台。平台应用的具体模式有多种，其中有浏览器模式、客户机模式、移动设备模式等。

## 2.6. 北斗定位原理

北斗定位原理：北斗卫星导航系统所用的无源定位方法与 GPS 的相同。根据北斗卫星传送的定位信号，北斗用户可推算得到自身的 3 维姿态精确参数和 7 维状态精确参数。

其理论依据是，北斗导航系统的空间段会有 35 颗卫星(目前是 14 颗)，在高空中以 12 小时的周期围绕地球运行，从而在任一坐标及任一时刻可同时观测到的卫星数均在 4 颗以上。根据卫星的精确位置，在北斗观测中，根据 3 颗卫星与我们所能够获得卫星至接收机的距离，再加上三维坐标中的距离公式，即可构成一个 3 阶线性方程组，进而得到观测点的位置(X, Y, Z)。因卫星的时钟与接收机时钟间存在误差，事实上有 X、Y、Z 和钟差等 4 个未知参数，故应加入第 4 颗卫星来构成一个 4 阶线性方程式进行求解，以此算出观测点的高程和经纬度。通常情况下，接收机可同时锁定的卫星数在 4 颗以上，根据卫星的星座分布，可将所有锁定的卫星划分成有限组，其中每组 4 颗。最后经算法找出误差最小的一组用于定位，由此提高精度。为了降低时钟差、大气折射误差等影响，提高定位精度，北斗系统也引入了与 GPS 相同的差分定位技术，当下应用较广的差分技术有两种：伪距差分技术与载波相位差分技术[3]。

## 2.7. 伪距差分技术

伪距差分技术是如今应用面最大的差分技术，其基理是：解出可见卫星与基准站上的接收机的距离，并比较含有误差的测量值与所得距离，通过一个 a-p 滤波器，将此差值进行滤波，得到偏差，接着向用户输送全部卫星的测距误差，用户再根据所得测距误差来矫正测量的伪距。最后，用户根据矫正过的伪距来求得自己的位置，进而去除公共误差，提升定位精度[3]。

伪距并不是接收机和卫星之间的实际距离，在传播过程中，各种因素的影响把各种误差累加在实际距离上。为了区分真实距离，所以称之为伪距，一般用  $\rho$  来表示，单位为 m。造成伪距的偏差主要有：卫星的钟差、接收机的钟差与由电离层、对流层和多效应等引起的各种空间传播误差。主要由接收机的钟差与卫星信号到接收机的时延的和乘以光速得到的，其伪距定位公式为：

$$\rho = r + \delta t_u - \delta t^{(r)} + I + T + \varepsilon \quad (1)$$

式中： $r$  为卫星到接收机的几何距离； $\delta t_u$  为接收机的钟差； $\delta t^{(r)}$  表示卫星的钟差； $I, T, \varepsilon$  分别表示电离层、对流层和多路效应等其他误差造成的大气传播延迟叠加在伪距上产生的伪距变化量； $\varepsilon$  表示所有未直接体现在式(1)中的误差的总和[4]。对于式(1)， $\delta t^{(r)}$ 、 $I, T$  基本都可以建立误差模型进行消除， $\varepsilon$  误差很小，可以忽略不计， $r$  中包括了接收机的位置信息( $x, y, z$ )，所以此公式包括了 4 个未知数  $x, y, z$ ，要解出这 4 个未知数，便要观察 4 个北斗卫星，从而建立 4 个方程，如：

$$\rho_k^i = \sqrt{(x^i - x_k)^2 + (y^i - y_k)^2 + (z^i - z_k)^2} + c \cdot \delta t_u, \quad i=1,2,3,4 \quad (2)$$

式中：接收机到卫星  $i$  的伪距为  $\rho_k^i$ ， $x^i, y^i, z^i$  分别代表卫星  $i$  的空间位置； $x_k, y_k, z_k$  表示接收机的空间位置坐标； $c$  为光速， $c = 2.99792458 \times 10^8$  m/s。

## 2.8. 载波相位差分技术

载波相位差分技术又叫做 RTK 技术(real time kinematic)，其基于实时处理两个测站的载波相位，能给出观测点厘米级精度的实时三维坐标。与伪距差分原理一样，由基准站利用数据链，将载波观测量及站坐标信息实时输送至用户站，用户站接收分别来自基准站与北斗卫星的载波相位，使其一同构成相位差分观测值，通过实时处理得到厘米级的定位结果[3]。

载波相位相对定位建立在载波相位观测值之上，可以做到准确、实时地推算在特定坐标系中，用户接收机的三维定位实况，其精度可至厘米级。该系统模型包括两台接收设备，其中一台作为基准站，另一台作为移动站，用于实时接收基准站的原始观测数据，再据此构造载波相位双差观测方程。经差分过程可降低乃至除去公共误差的影响，实现实时数据处理，解算整周模糊度，检测和修复周跳，以此实时确定移动站位置。

在载波相位差分定位中，接收机  $j$  观测卫星  $P$  的载波相位的观测方程为

$$\varphi_j^p \lambda = \left[ (X^p - X_j)^2 + (Y^p - Y_j)^2 + (Z^p - Z_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - CV_{t_j} + CV_{t_p} - N_j^p \lambda - (V_{ion})_j^p - (V_{trop})_j^p \quad (3)$$

式中： $\varphi_j^p \lambda$  为接收机  $j$  对卫星  $P$  的载波相位观测值； $\lambda$  为载波波长； $(X^p, Y^p, Z^p)$  为卫星  $P$  的坐标； $(X_j, Y_j, Z_j)$  为接收机  $j$  的坐标； $C$  为电磁波传播速度； $V_{t_j}$  为接收机  $j$  的钟差； $V_{t_p}$  为卫星  $P$  的钟差；卫星  $P$  的载波相位在接收机  $j$  观测下的整周模糊度为  $N_j^p$ ； $(V_{ion})_j^p$  为接收机  $j$  和卫星  $P$  间的电离层误差； $(V_{trop})_j^p$  为接收机  $j$  和卫星  $P$  间的对流层误差。在基线较短时，两个观测站  $i, j$  具有近似一样的电离层和对流层改正参数，将两个接收机各自相对于两颗卫星的单差方程做差，就可消除了电离层、对流层改正参数、接收机和卫星钟差，由此有相对于两颗卫星的双差观测方程：

$$\Delta \varphi_{ij}^{pQ} \lambda = (-l_i^p + l_i^Q, -m_i^p + m_i^Q, -n_i^p + n_i^Q) \cdot (\delta X, \delta Y, \delta Z) - \Delta N_{ij}^{pQ} \lambda \quad (4)$$

式中： $\Delta \varphi_{ij}^{pQ}$  为两个观测站  $i, j$  相对卫星  $P, Q$  的载波相位双差； $(l_i^p, m_i^p, n_i^p)$  为卫星  $P$  方向向量； $(l_i^Q, m_i^Q, n_i^Q)$  为卫星  $Q$  方向向量； $(\delta X, \delta Y, \delta Z)$  为移动站坐标的改正数向量；两个观测站  $i, j$  相对卫星  $P, Q$  的整周模糊双差为  $\Delta N_{ij}^{pQ}$ 。由此得到载波相位双差观测方程，其中整周模糊度的快速解算是决定载波相位差分定

位是否解算成功的主要因素。整周模糊问题解决后通过解方程组就可以得到 $(\delta X, \delta Y, \delta Z)$ ，从而完成相对定位解算[5]。

北斗 RTK 技术的基本思想是：先在已知的坐标位置设置基准站，再输送观测数据(包括伪距、相位)和基准坐标给流动站接收机，流动站收到卫星信号后对信号进行处理，计算出流动站的坐标信息，定位速度由几秒到几分钟不等。流动站可以使用静态或者动态方式，而在桥梁监测时，则通常选择安置在指定地点。

### 3. 误差控制

因为测量过程中时常出现多种类型的误差，所以测量人员应对不同类型的误差运用不同的控制方法，GPS RTK 测量中控制误差时常用的策略有以下 4 个。

#### 3.1. 同测站误差控制

常因对天线相位的变化关注不够，以至点位坐标误差达到 3~5 cm，但通常 GPS RTK 定位误差要求不超过 1 cm，所以通过天线的精准相位图与基站来改进所得数据，并在实验室内检查天线的相位，以此提高精度，从而降低误差。

#### 3.2. 多径误差控制

此类误差出于周边天线所处的环境影响，达到 5~19 cm，误差较大，所以为了对其强化控制，应在开阔的地带选择无反射点的点位，并使用扼流圈天线，同时在施工点配置能够吸收电波的材料与设备，以此消除或减轻由电波干扰引起的不良影响。

#### 3.3. 信号干扰带来的误差控制

由于大多数情况下不能够直接移除干扰源，因而只能采用其他合理措施，避开或减轻信号干扰。因此须科学选点，并尽量对电磁波带来的辐射与干扰进行加强监测。另外，在选点前应尽量运用仪表设备来消除或减轻该影响，同时需注意到不可在天气恶劣或者天气急剧变化时进行测量工作。

#### 3.4. 轨道误差控制

此类误差虽仅几米，但其遗留的相对误差却会造成很大的影响，一般 10 km 的短基线可以忽略，但 20~30 km 的基线则不行，会有几厘米的影响。由于电离层的误差存在很强的瞬变性、互补性与扩散性，因此测量人员需利用双频接收机来消除电离层所造成的影响。另外，为确保其厘米级的精度，还应考虑到观测站自身的误差，以此促进误差的消除。

## 4. 结语

本文应用价值为可在测量过程中系统考虑多方面误差提供参考依据，进而使测量所获数据更加准确。基于北斗卫星导航系统，通过综合运用两种差分技术可进一步提高桥梁变形监测的精度，从而可观测到较原始数据所呈现出的更贴近真实的桥梁形变现状，进而提高安全性等。

## 基金项目

浙江海洋大学大学生科技创新活动计划暨育苗人才计划项目(YMJH201631)。

## 参考文献 (References)

- [1] 徐洪涛, 郭国忠, 蒲焕玲, 等. 我国近年来桥梁事故发生的原因与教训[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(11):

90-95.

- [2] 安庆, 李岩, 张婷婷. 桥梁安全监测系统设计与应用[J]. 城市勘探, 2016(1): 11-15, 19.
- [3] 周丽静. 基于北斗卫星系统的露天矿边坡位移监测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015: 1-14.
- [4] 刘春. 改进卡尔曼滤波在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器报, 2016, 30(5): 785-799.
- [5] 翟建勇. 载波相位差分相对定位解算及性能提升研究[J]. 全球定位系统, 2016, 41(1): 1-5, 13.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

- 1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
- 2. 为您匹配最合适的期刊
- 3. 24 小时以内解答您的所有疑问
- 4. 友好的在线投稿界面
- 5. 专业的同行评审
- 6. 知网检索
- 7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)