

代 号	10701	学 号	1101120600
分 类 号	TN927.2	密 级	公开
U D C	654.9	编 号	

题（中、英文）目 基于差分 GPS 的高精度在线定位系统研究  
Research on DGPS Based High-precision  
Online Positioning System

作者姓名 周轶红 学校指导教师姓名职称 刘祖军副教授  
工程领域电子与通信工程 企业指导教师姓名职称 李永前 高工  
论文类型 应用研究 提交论文日期 二〇一三年十二月

## 西安电子科技大学

### 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切的法律责任。

本人签名：\_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_

## 西安电子科技大学

### 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律署名为西安电子科技大学。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

本学位论文属于保密，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本人签名：\_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_

## 摘要

输电线路的在线监测系统，尤其是厘米级精度的输电线路在线监测系统对于保障输电线路的安全运行具有非常重要的意义。本文综合考虑实际应用环境和定位精度的要求，设计了基于差分 GPS 的高精度在线定位系统，期望通过此系统实现输电线路导线舞动和风偏的在线实时监测。该设计基于差分 GPS 的基本原理，实现了移动站位置信息的实时监测。测试结果表明，此次设计的系统精度达到厘米级范围，满足输电线路的在线监测需求。

本文的主要工作如下：

1. 研究了 GPS 以及差分 GPS 技术，综合考虑实际应用环境和定位精度的要求，设计了基于差分 GPS 的高精度在线定位系统。
2. 完成了详细的系统设计方案，包括系统的工作模式、器件选择以及各部分之间的通信连接等。
3. 设计了包括电源、电平转换等模块在内的外围电路，完成了电路板的制作和调试。
4. 搭建了两种不同的系统测试平台。测试结果表明，此次设计的系统定位精度达到厘米级范围，满足实际应用的需求。

**关键词：**差分 GPS    定位    高精度



## Abstract

An online real-time monitoring system on transmission-line conductors, especially a system of the accuracy up to centimeter-level has very important significance for the safe operation of transmission line conductors. Considering the practical application environment and the precision requirement, a high-precision online positioning system based on DGPS is presented in this paper. It is expected to realize the online real-time purpose of monitoring transmission conductor wave and wind gallop. This design is based on the principle of differential global positioning system and achieves an access of the real-time location information of mobile stations. Several tests have verified that the system accuracy is within the scope of centimeter-level. That is to say the system can meet practical requirements of transmission-line conductors.

The main work is as follows:

1. Based on GPS and DGPS techniques, a high-precision online positioning system based on DGPS is designed considering the practical application environment and the accuracy requirements.
2. The detailed scheme of the system is accomplished, including the design of the system mode, the selection of device for each section, and the communication plans among each part.
3. The design of the peripheral circuit which includes the modules of power, level switch and so on is completed. After then the production of the circuit board is fulfilled.
4. Two different testing platforms are built after the accomplishment of the system scheme and the test of the circuit board. The results show that the accuracy of the system can reach centimeter-level, that is to say this system can meet practical requirements.

**Keywords: DGPS positioning high-precision**



# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 发展现状.....	2
1.3 论文工作及章节安排.....	3
第二章 GPS 系统概述 .....	5
2.1 GPS 定位 .....	5
2.1.1 星座及其覆盖特性.....	5
2.1.2 位置精度.....	6
2.2 差分 GPS 定位技术 .....	8
2.2.1 差分技术.....	8
2.2.2 定位原理.....	9
2.2.3 基本定位算法.....	11
2.2.4 误差分析.....	13
2.3 本章小结.....	14
第三章 系统的方案设计.....	15
3.1 引言.....	15
3.2 工作模式设计.....	15
3.3 系统器件选择.....	16
3.4 各组成部分设计.....	25
3.4.1 基站设计.....	25
3.4.2 移动站设计.....	27
3.4.3 终端设计.....	28
3.4.4 底板设计.....	28
3.5 本章小结.....	32
第四章 系统的测试和分析.....	33
4.1 系统测试平台的构建.....	33
4.1.1 测试环境介绍.....	33
4.1.2 测试平台的搭建.....	33
4.2 系统初始化.....	36
4.2.1 电台的初始化.....	36
4.2.2 主板的初始化.....	38
4.3 测试结果分析.....	40

4.3.1 不加终端的测试平台.....40

4.3.2 加入终端的测试平台.....57

4.4 本章小结.....62

结束语.....63

致谢.....65

参考文献.....67



## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景和意义

随着电力市场化步伐的不断推进以及客户对电能可靠性要求的不断提升，输电作为其至关重要的环节，它的性能将直接影响到整个电力系统<sup>[1-2]</sup>。输电线路系统的骨架是架空导线，架空线路成本低，架设及维修方便，使用十分广泛，但是架空导线很容易受到气象和环境的影响。此外，由于线路铺设面广，管理难度大，塔基被盗割的现象也时常发生，这些同样也对输电线路的安全造成了严重的威胁。

当今世界，利用直升机巡、护线是各国电力部门巡查线路故障、保障线路安全、进行有效管理的主要措施之一。目前，国内比较有效的线路巡查方法也就是利用直升机来进行巡线。虽然利用直升机巡护线可以给输电线路监测带来很多的益处，但利用这种技术也存在着很多的弊端。首先，投资成本太大。购置一架直升飞机大约为需要 2000 多万元，其日常运营的油费、保养费等每年约需要 800 万元。其次，不能实现实时监测。利用直升机巡线不能实时地反馈线路的故障情况，只能给出当时线路的状态。第三，容易受到天气条件的限制。狂风暴雨等恶劣天气是线路故障的高发期，需要增加巡线工作，但是直升机在这种恶劣的天气下无法进行巡线。

此外，目前其他有效的输电线路监测系统<sup>[3-4]</sup>主要有基于位移和加速度传感器的在线舞动监测，基于 GSM/SMS 和 Zigbee 网络的舞动及风偏监测；基于 OSM/SMS 的导线覆冰和舞动的在线监测；基于监测仪及计算机网络的远程线路风偏监测；基于无线 GSM 传输模块的导线舞动信息数据的检测，基于新型微加速度传感器的实时导线舞动测量等。这些方法主要都是通过检测仪器或者是传感器测量导线的舞动及风偏的数据，这些测试的主要缺点是测量数据不是线路的实时位置数据，而是移动、导线张力、振动频率、风偏角、倾斜、导线舞动频率、绝缘子倾斜角等的间接数据。

同时，采用摄像技术来监测导线舞动和风偏在实践中也得到了一定的应用，它是通过摄像技术得到导线舞动和风偏的定性结果，但是该方法不能实现监测数据的定量分析，因而得不到导线舞动和风偏的准确信息。

因此，提高输电线路监控的实时性和可靠性，成为了目前输电线路监控的一大难题。目前，国内已经有很多厂家在考虑研发这类产品，也开始小规模的应用。但是，由于其在电源、通讯、安装等多方面还是存在很多的问题，限制了这类产品的广泛应用。因此，实时监控系統还需再长期的开发、测试、试点、优化再优化。

本文结合目前输电线路监测的种种情况，针对输电系统性能更高的要求，希望能够改善输电线路监测的实时性能和定位精度。文中提出了基于差分 GPS 的高精度在线定位系统，期望利用此系统来实时获取输电线路定位信息，监测输电线路是否正常，以便采取更加及时、有效并且合理的措施。

## 1.2 发展现状

从 1957 年 10 月世界上第一颗卫星发射成功以后，利用卫星来进行定位和导航的工作就开始受到人们的广泛关注。从美国的 GPS 全球卫星定位系统到俄罗斯的 GLONASS 全球卫星定位系统，再到欧盟的 GALILEO 等全球卫星定位系统，卫星导航系统一直不断拓展它的应用领域，具有重要的战略意义和巨大的经济效益<sup>[5]</sup>。

我国在 2000 年建成了北斗一号卫星导航系统，成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家，它对提升我国的国际地位、促进经济的发展、保障产业安全具有非常重要的意义<sup>[6]</sup>。与 GPS 和 GLONASS 相比较而言，北斗导航系统主要的特点是利用率高，花费少，卫星测轨精度对导航定位精度没有特别影响。北斗卫星导航系统采用的体制和技术与全球定位系统类似，其系统同样分为三大部分，即空间部分、地面监测及数据处理部分、用户接收机部分。但是它与全球定位系统具有显著的不同，主要表现在卫星的星座空间分布、伪随机噪声码序列及捕获方式、导航电文的调制和编码、载波频率及码频率、用户的定位解算等<sup>[7]</sup>。

GPS 卫星导航系统采用了多星、高轨、高频、测时—测距体制，具有全天时、全天候、全球覆盖、高精度、实时导航定位、用户设备轻巧等特点<sup>[8]</sup>，在航天测控、大地测量、地面及空中的交通管制、科学研究等领域获得了广泛的应用，形成了庞大的卫星导航产业。

随着用户对卫星导航测量及数据的精度和实时性要求越来越高，我们必须充分利用新的数学方法不断改进和提高卫星导航测量数据的处理方法，特别是在既定的卫星导航系统的条件下提高导航测量数据处理的水平。这些新的数学方法包括差分技术、函数逼近、数据融合以及统计估计等等。

目前，提高定位精度尤其是动态定位精度的方法主要有两大类：一类是基于单个 GPS 接收机的输出信息进行数据处理；另外一类就是借助其他手段或设备，这以差分 GPS 技术<sup>[9-13]</sup>、与地理信息系统相结合、多传感器的数据融合等为主要代表。同时，用户数据处理也不再局限于 GPS 输出的位置信息，可以根据用户需要，自行研究定位解算方法。在 GPS 定位中，GPS 差分定位的精度比较高，目前也已经得到了广泛的应用，它主要集卫星测量、信号处理以及通信等技术为一体。随着信号处理以及通信技术的不断发展，更有效、更精确的定位方式也是层出不

穷，其中比较具有代表性的技术之一就是 RTK 技术<sup>[14-16]</sup>。RTK 技术以其较强的实时性和较高的效率、点位误差不累积、直观快捷、操作简单等优点在实际中得到普遍的应用。

### 1.3 论文工作及章节安排

本文主要就是针对输电线路监测精度和实时性的要求，设计了基于差分 GPS 的高精度在线定位系统，并在两种不同的测试平台下对系统的性能作了详细的测试。本文的主要章节内容安排如下：

第一章 绪论。介绍本文的研究背景和意义，介绍卫星定位系统的发展现状。

第二章 GPS 系统概述。介绍 GPS 定位的相关知识，在此基础上进一步介绍差分 GPS 技术的相关理论。

第三章 系统的方案设计。该部分介绍详细的系统设计方案，包括系统的工作模式、器件选择以及各部分之间的通信连接等。同时，介绍包括电源、控制、电平转换等模块在内的外围电路设计。

第四章 系统的测试和分析。介绍两种系统测试平台，分别在不同的测试平台下测试系统的性能。



## 第二章 GPS 系统概述

卫星导航系统是国家重要的信息基础设施，它是关系到国家安全的战略基础资源。目前，GNSS已经进入到百家争鸣、百花齐放的时代，GPS、GLONASS都已建成并投入运行了，COMPASS/北斗及GALILEO系统的建设<sup>[17]</sup>也先后在中国和欧盟启动了。

### 2.1 GPS 定位

全球定位系统(简称 GPS, Global Positioning System)是由美国研制的一种全天候中距轨道卫星导航系统<sup>[18]</sup>。利用此系统，用户可以在全球任意的近地空间内完成导航、测绘和精确定位等。随着卫星测量技术的发展，GPS 卫星定位技术以其速度快、精度高、自动化程度高、经费少以及不受通视条件限制等优点，已经成功地应用在了大地和工程测量、导航和管制、资源探测、航空摄影等多种科学，取得了比较好的经济和社会效益。

#### 2.1.1 星座及其覆盖特性

GPS系统的空间星座组成主要包括24颗GPS卫星，其中3颗GPS于备用，另外21颗GPS卫星则用于正常的工作。卫星分布如图2.2所示，全部24颗GPS均匀分布在6个距地大约20200km的轨道面上，轨道倾角为 $50^{\circ}$ 。各个轨道面升交点的赤经相差 $60^{\circ}$ ，相邻的轨道平面卫星升交角距为 $30^{\circ}$ 。轨道长半径约为26560km，最大的偏心率为0.01，轨道近似圆轨道，属于高圆轨道，平均高度约为20000km，运行周期为11h58min。

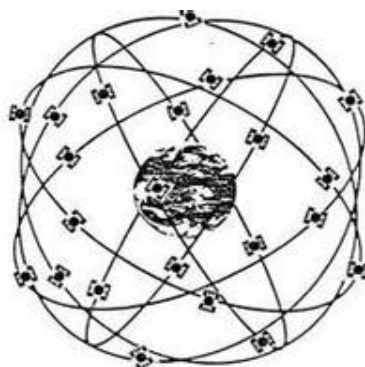


图2.1 GPS卫星星座分布图

根据图 2.1 卫星星座分布图上的卫星布局 and 轨道可以看到，用户在地球上任意

的一个地区、近地面上空任意一点同时观测 4 颗及以上的卫星，就可以保证三维导航能力和全球覆盖，为用户提供全天候、实时、高定位精度的三维位置、连续和精确的时间等。

### 2.1.2 位置精度

大多数使用GNSS的用户最关心的是位置精度以及给定精度下的可信度。采用多星座的卫星导航系统，可以大幅增加可见星的数目，大大提高系统可用性和可靠性，提高定位精度。但是，在增加可见星的同时定位运算量会成倍增长，为了能够实现实时处理，接收机的负担就会大大地加重，成本也会不断上升。事实上，导航定位不可能使用所有的可见星，也不需要使用所有的可见星，只需要从中选出少数的满足精度要求的卫星进行导航定位即可<sup>[19-22]</sup>。

利用GPS进行绝对定位(或单点定位)，其精度主要决定于两个因素：其一通常称为卫星分布的几何图形，它描述了所测卫星空间上的几何分布，；其二是观测量的精度<sup>[23-24]</sup>。位置精度用式(2-1)来表示。

$$Accuracy = UERE \times DOP \quad (2-1)$$

其中，Accuracy表示位置精度，UERE表示用户的等效距离误差，DOP是精度因子。Accuracy数值越小，得到的用户定位精度则越高。

#### (1) DOP因子

DOP反映了卫星在空间上的几何分布情况，它是轨道参数和星座大小的函数。通常有几何精度因子GDOP、空间位置精度因子PDOP、接收机钟差精度因子TDOP、平面位置精度因子HDOP以及高程精度因子VDOP。

在“测时—测距”体制的卫星定位系统中，对非线性观测方程线性化，可以得到：

$$\Delta \rho = \mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{X} \quad (2-2)$$

其中， $\mathbf{G}$ 是从待测点初始位置 $(x_0, y_0, z_0)$ 到各个可见卫星 $(x_i, y_i, z_i)$ 的方向余弦构成的 $n \times 4$ 阶矩阵， $n$ 是待测点由可见性定义和判断来计算得到的可见星数。

为了使方程(2-2)能够迭代求解，就要求矩阵 $\mathbf{G}$ 非奇异，从而有 $n \geq 4$ 。对4颗及以上的可见星利用最小二乘法，有

$$\Delta \mathbf{X} = (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \Delta \rho \quad (2-3)$$

定义GDOP是几何精度衰减因子，它表示的是测距误差到位置/定时误差之间的放大系数，即

$$GDOP = \frac{RMS_x}{RMS_\rho} = \frac{\sigma_x}{\sigma_\rho} \quad (2-4)$$

式(2-4)中RMS是均方根。更进一步，得

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}}{\sigma_\rho} = \sqrt{Tr \cdot (G^T \cdot G)^{-1}} \quad (2-5)$$

其中， $Tr( )$ 为迹算子。

卫星星座的几何结构会影响定位的误差，为了更加深入地分析其对定位误差造成的影响，我们定义PDOP是位置精度衰减因子，它表示从测距误差到三维位置误差之间的放大系数，即

$$PDOP \approx \frac{RMS_{(x,y,z)}}{RMS_\rho} = \frac{\sigma_{(x,y,z)}}{\sigma_\rho} \quad (2-6)$$

从而，有

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_\rho} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \quad (2-7)$$

其中，

$$Q = (G^T \cdot G)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

类似地可以定义TDOP为时钟精度衰减因子。

借助以上的DOP因子定义，定位方程求解的结果误差可用距离测量误差和DOP因子直接相乘来得到，从而使定位系统的误差分析更加简化。在卫星定位系统设计当中，可以通过深入分析DOP因子从而优选定位星座的相关参数。对DOP因子特性进行深入研究发现：

1) DOP因子的坐标变换不变性。采用不同坐标系来描述问题时，可以看到DOP因子保持不变。

2) DOP因子的坐标表示不变性。当采用不同坐标表示形式来表示定位结果时，同样，DOP因子依然保持不变。

## (2) UERE

GPS利用C/A码定位，精度可以达到14m；利用P码定位，精度可以达到3m。美国采用了SA政策，人为将误差引入到卫星时钟及卫星数据里面，从而降低GPS的定位精度来防止别国把GPS用做军事目的。

UERE是伪距观测值的变化值，它是根据卫星到接收机路径上如电离层延迟、

卫星钟差等各种因素预测的。在GPS定位过程中，其主要误差来源包括卫星时钟误差、卫星星历误差、电离层和对流层误差、多径效应误差、卫星轨道误差、卫星天线的相位中心误差以及接收机相位中心误差和噪声等。

**卫星时钟误差：**时钟误差主要包括卫星钟差以及接收机钟差。卫星时钟精度一般都采用高精度原子钟来保证定位精度，高精度原子钟和GPS标准时存在一定的偏差和漂移，总量在 $1\text{ms}\sim 0.1\text{ms}$ 以内；接收机钟差和接收机的质量有关，它对伪距和载波相位观测的影响相同。卫星轨道误差及卫星钟误差是综合影响，又称作是空间信号误差(URE)，2010年美国GPS公布的空间信号误差是2小时龄期 $0.8\text{m}\sim 0.9\text{m}$ 。

**卫星星历误差：**它是由卫星星历得到的卫星位置 and 实际位置之间的偏差。这种误差主要取决于卫星监测系统的精度、质量、轨道力学模型、观测值数量以及定轨软件的完善程度等，它表征了一种起始误差。

**电离层误差：**距离地面  $50\sim 1000\text{km}$  的高空称为电离层。电离层的折射现象会使码相位测量变长、载波相位测量变短，从而会产生电离层的延时误差。电离层延迟误差和电磁波传播路径上的 TEC 以及频率密切相关，通过电离层的信号路径长度取决于卫星的仰角，这些可以通过模型来进行描述，采取双频或三频组合观测、经验电离层模型、格网电离层模型等方法进行修正。电离层的延迟误差模型修正一般在  $50\%\sim 60\%$  左右，而电离层格网或者多频点组合改正可达到  $90\%$  以上。

**对流层延迟误差：**对流层延迟误差主要指非电离大气对信号的折射影响。因为折射影响大部分都发生在对流层，一般称为对流层折射，通常情况下，空气密度决定了对流层折射率，而空气密度和气压、温度、湿度等等因素有关。

**多路径误差：**GPS 测量中，除了接收到来自卫星的信号以外，有时接收机天线还会接收到一些天线周围的地物一次或者多次反射的信号，从而导致观测值偏离真实值而产生多径误差，称之为多径效应，多径效应严重时可能会导致卫星信号失锁。伪距多径效应误差大概是载波相位多径影响的 200 倍左右，其周期和载波相位多径误差周期相同。

**其他误差：**在信号传播、测量过程中，不可避免地会遇到一些未知因素，由这些原因导致的误差也考虑在内。

## 2.2 差分 GPS 定位技术

### 2.2.1 差分技术

由前一节的内容知道，用户定位精度主要决定于星座几何构型(DOP)以及用户等效距离误差(URE)，其中 UERE 涵盖了用户定位解算过程中各种误差项。差分



技术<sup>[17]</sup>的主要作用就是为了修正卫星时钟误差、卫星轨道误差以及电离层延迟误差，提高用户的定位精度，提升连续性、可用性以及完好性等性能。

目前，差分技术已经从最初的单站的位置差分以及伪距差分，逐渐地发展到现在的 PPP(精密单点定位)、载波相位差分、以及 RTK(实时差分)等高精度的处理技术，用户的应用模式也不断扩展，所获定位精度同时也在不断提高。

根据差分技术的特点来分，目前主要的差分方法可以分为两种：观测值域差分以及状态空间域差分。其中，观测值域差分不会去区分误差来源，它只对综合误差模型化，然后播发给用户。状态空间域差分则是通过区分 GNSS 误差来源，分别针对不同种类型的误差进行改正，它的误差来源包括了卫星钟差、卫星轨道误差以及电离层的延迟误差等。可见，状态空间域差分不会受到基准站距离的影响，能够实现广域范围内的同等精度的差分定位。观测值域差分和测站空间分布有关，其差分定位性能和基准站的距离密切相关，这种差分模式会受到距离的限制。

依据这两类主要差分技术的原理，在具体的实现过程中逐渐发展了与之相应的两种算法，即差分改正数算法和用户端定位算法。

(1) 基于状态空间域的差分模式，在这种模式下，用户在广域范围内获取差分改正数，然后采用 SPP 或者 PPP 等算法，并在此基础上逐渐形成了广域差分以及广域精密定位两种技术。

(2) 基于观测值域的差分模式，在这种模式下，用户在局域范围内获取差分改正数，然后采用伪距双差分或者载波双差分等算法，并在此基础上逐步形成了局域差分和网络 RTK 两种技术。

### 2.2.2 定位原理

差分GPS定位技术的基本原理，即是利用具有高精度设备的基准站，利用差分算法，抵消公共误差，例如卫星星历误差、卫星时钟偏差、对流层误差、电离层误差等，使移动站达到一定的定位精度<sup>[25-34]</sup>。

#### (1) 数据通信链路

差分定位系统经常使用的几种数据通信链路主要有UHF频段数据链、HF频段数据链、卫星链路、移动通信网等。

1) UHF频段数据链。此链路在300MHz~3000MHz，通常使用420MHz~480MHz。这种数据链主要用在局域差分GPS系统中，性能良好，一般其可靠的传输距离低于30km。当前，在很多城市的商用差分GPS数据通信链路的实现都选择采用此频段车载无线电台。

2) HF频段数据链。此链路在3MHz~30MHz，通常使用4MHz~7MHz，这是一

个天波系统,可以实现长距离的传输,距离可以超过350km。通常情况下,发送和接收采用两个不同的频率,从而保证正确的发送和接收参考改正数。

3) 卫星链路。此链路主要利用的是同步通信卫星,通常应用在长距离的差分链路中。但是,此链路会受到天线形状以及卫星设备费用等的限制。

4) 移动通信网。差分定位系统采用移动通信网来提供定位技术,具有非常好的应用前景,此业务可以获取定位信息数据等。但是同时,由于受到移动通信环境的部分影响,想要在移动通信网络中实现对移动终端的精确定位还需要解决其中的很多技术难点。基于此网的差分定位技术有很多优点,如方便地获取定位信息,便于移动用户的跟踪监测,便于网络资源的管理、更新、规划和利用等。它的定位精度除了受到传播时延误差及多径干扰等影响外,还会受到移动通信网的多址干扰的影响。

## (2) 定位原理

差分GPS定位系统主要是由基站(Bass)和移动站(Rover)组成,如图2.2所示。一般情况下,基站设在某些固定点上,移动站安装在一些移动的载体上,多个移动站可以同时工作,在运动过程中基站与移动站同步来观测GPS卫星。

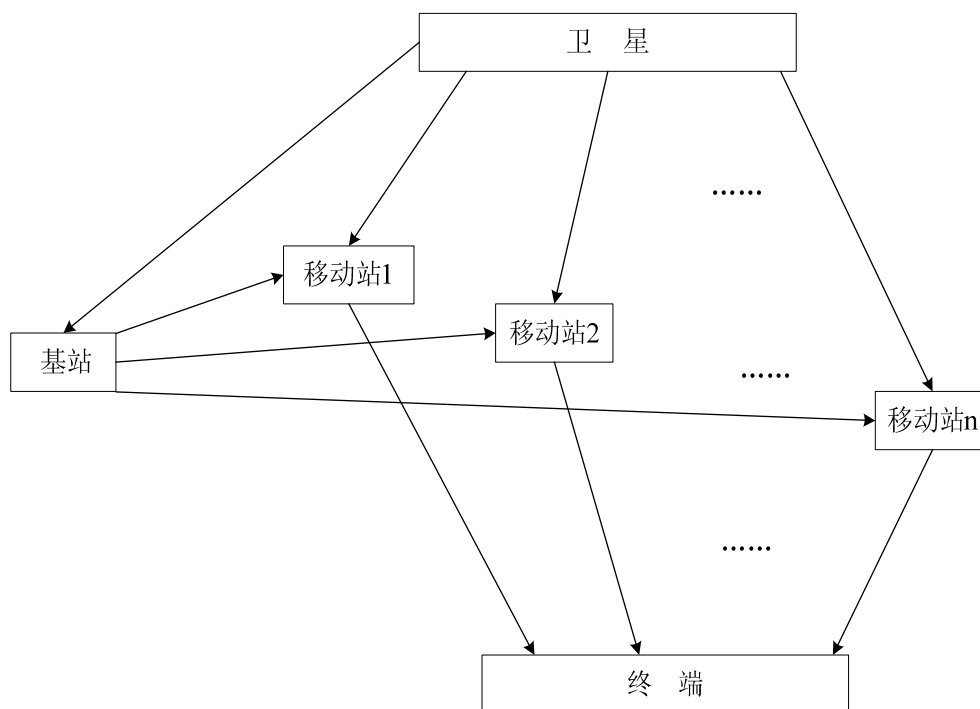


图2.2 差分GPS定位系统原理图

如图2.2所示,基站接收卫星发送的位置信息,将此信号和已知的基站精确位置进行比较,得到基站的差分校准信息。基站将该信息发送到移动站,该差分校准信息主要是作为移动站定位信息的校正信号。当移动站收到基站发来的差分校准信息,通过和自己获得的卫星发送的信号相校准,得到移动站的准确位置信息,然后输出到终端。由此可以提高系统的测量精度。

如果可以及时将改正值发送给若干台同步观测某些卫星的移动站GPS接收机，移动站GPS接收机经过改正得到的实时位置，称为实时差分动态定位。

### 2.2.3 基本定位算法

差分GPS定位算法一般可以分为三种。第一种是位置差分，第二种是码差分定位法，它以测码伪距作为观测量，另外一种则是载波相位差分定位法<sup>[35]</sup>，它是载波相位作为观测量。

#### (1) 位置差分

设基准站的精确坐标是 $(X_0, Y_0, Z_0)$ ，由基准站 GPS 测得的坐标为 $(X, Y, Z)$ ，则有改正系数：

$$\Delta X = X_0 - X \quad (2-9)$$

$$\Delta Y = Y_0 - Y \quad (2-10)$$

$$\Delta Z = Z_0 - Z \quad (2-11)$$

移动站接收机自身观测到的待测点 P 的坐标为 $(X'_p, Y'_p, Z'_p)$ ，接收机接收到改正信息后，则待测点 P 的实际坐标：

$$X_p = X'_p + \Delta X + d(\Delta X) / dt(t - t_0) \quad (2-12)$$

$$Y_p = Y'_p + \Delta Y + d(\Delta Y) / dt(t - t_0) \quad (2-13)$$

$$Z_p = Z'_p + \Delta Z + d(\Delta Z) / dt(t - t_0) \quad (2-14)$$

这种计算方法非常简单，它对各种型号 GPS 接收机都适用，前提是基站与移动站接收到同一组的卫星数据，这在基站和移动站的距离较远时很难做到。

#### (2) 码差分定位

码差分能够满足米级的定位精度，其基本原理如下：在基准站上 GPS 接收机观测所有可视的 GPS 卫星，利用已知的基准站坐标 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 以及星历计算的卫星地心坐标 $(X^j, Y^j, Z^j)$ ，按式(2-15)式计算出每颗卫星在每个时刻到基准站的真实距离 $R^j$ ：

$$R^j = \left[ (X^j - X_0)^2 + (Y^j - Y_0)^2 + (Z^j - Z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (2-15)$$

假设伪距观测量为 $\rho_0^j$ ，则伪距改正量：

$$\Delta \rho^j = R^j - \rho_0^j \quad (2-16)$$

相应的改正量的变化率为：

$$d\rho^j = \Delta\rho^j / \Delta t \quad (2-17)$$

基准站将  $\Delta\rho^j$  和  $d\rho^j$  发给移动站，移动站根据利用改正量和测出的伪距量  $\rho^j$ ，根据式(2-18)就可以求出修正后的伪距：

$$\rho_p^j = d\rho^j + \Delta\rho^j + \rho^j(t-t_0) \quad (2-18)$$

并按式(2-19)可以计算出移动站的坐标( $X_p, Y_p, Z_p$ ):

$$\rho_p^j = \left[ (X^j - X_p)^2 + (Y^j - Y_p)^2 + (Z^j - Z_p)^2 \right]^{1/2} + C * \delta t + V_c \quad (2-19)$$

其中， $X_p, Y_p, Z_p$  表示移动站的坐标， $V_c$  表示测量噪声， $\delta t$  表示钟差， $C$  为常系数。

这种差分应用较为广泛，基准站提供所有卫星的改正数，所以移动站只需要同时观测4颗卫星就可以完成动态定位。当基准站和移动站之间的距离较近时，两站间的公共误差可以很好的消除。同时， $\Delta\rho^j$  和  $d\rho^j$  可以使得移动站在未得到伪距改正量的间隙内依然可以继续差分定位。

### (3) 载波相位差分定位

一般情况下，三维载波相位差分实时定位的精度可以达到厘米级。RTK是典型的载波相位差分定位技术，它是以载波相位观测值为依据，在运动中利用载波相位差分进行实时GPS定位。它的主要工作原理是将基准站测得的载波相位信息发送到移动站，然后进行求差解算坐标，这种做法对站间通信链路以及移动站的运算速度要求比较高。因此，RTK 是信号处理技术和通信技术高度发展在测绘、导航方面的具体体现。

目前，求差解算坐标的主要方法有单差、双差和三差三种基本数模型，其中使用最广的是利用双差模型建立观测方程。当基准站和移动站之间距离较近时，利用双差观测方程可以很好地消除站间接收机钟差以及两站之间的公共误差，得到的双差观测方程为：

$$\nabla \Delta \ddot{o}^k(t) \ddot{e} = - \left[ \nabla l_R^k(t), \nabla m_R^k(t), \nabla n_R^k(t) \right] \cdot \begin{pmatrix} \ddot{a}X_R \\ \ddot{a}Y_R \\ \ddot{a}Z_R \end{pmatrix} - \nabla \Delta N^k \ddot{e} + \nabla \Delta \rho^k + V_p \quad (2-20)$$

其中， $V_p$  表示观测噪声。式(2-12)的未知参数主要包括双差整周模糊度  $\nabla \Delta N^k$  和移动站相对于基准站的坐标改变量 ( $\delta X_R, \delta Y_R, \delta Z_R$ )，求解此式的关键是  $\nabla \Delta N^k$  初始值的确定。一旦  $\nabla \Delta N^k$  的初始值确定以后就可以完成载波相位差分定位。观测过程中如果有新的卫星出现，就需要在运动中重新确定  $\nabla \Delta N^k$  的初始值，从而确保载波相位差分定位能够有效的实现。当整周模糊度确定以后，RTK的定位精度会远远高于码差分定位的精度。

设基准站  $T_b$ ，同步观测卫星为  $s^k$ ；移动站  $T_r$ ，同步观测卫星为  $s^j$ ，所得的双差相位观测量为：

$$\nabla \Delta \delta^k(t) = [\varphi_R^k(t) - \varphi_B^k(t) - \varphi_R^j(t) + \varphi_B^j(t)] \quad (2-21)$$

当基准站和移动站之间距离较近时，假设  $\tilde{n}_{R0}^i(t) = \tilde{n}_B^i(t)$ ，此时：

$$\nabla \Delta \rho^k(t) = [\tilde{n}_{R0}^k(t) - \tilde{n}_B^k(t) - \tilde{n}_{R0}^j(t) + \tilde{n}_B^j(t)] = 0 \quad (2-22)$$

移动站相对于基准站的坐标改变量为  $(\delta X_R, \delta Y_R, \delta Z_R)$ ，如果基准站坐标已知，则可以很容易的求出移动站的坐标。移动站对于两颗同步观测GPS卫星的方向矢量值差可以表示成：

$$[\nabla l_R^k(t), \nabla m_R^k(t), \nabla n_R^k(t)] = [l_R^k(t) - l_R^j(t), m_R^k(t) - m_R^j(t), n_R^k(t) - n_R^j(t)] \quad (2-23)$$

采用载波相位差分测量时，可以保证精度的工作范围大约在 20km 以内，对于移动的单元距离则小于 10km，而在此距离范围之外的定位精度会显著的下降，当工作距离需要更大时就需要建立相对应的基站网络才能够满足精度的要求。同时，当系统中如果有大量用户同时使用链路，还需要考虑链路的传输时延和数据速率，以满足用户定位的实时性要求。

## 2.2.4 误差分析

差分定位系统的基站和移动站误差分为两部分，即两者的公共误差以及各自的误差。

当基站和移动站之间的距离比较相近时(<20km)，两者的公共误差主要包括卫星时钟误差、星历误差、电离层效应、对流层效应、相对论效应等。公共误差对基站和移动站来说是高度相关的，经过差分定位系统处理这些误差可以完全的被消除。

基站和移动站各自的误差主要包括可消除、不可消除误差。可消除误差主要是安置位置误差、接收机钟误差以及天线相位中心变化。这些误差可以通过人为干预加以减小和消除。而不可消除误差主要包括接收机热噪声和多径效应。

在实际应用中多径效应和接收机热噪声是造成差分定位系统误差的主要原因。多径效应对测相伪距的影响达厘米级，对测码伪距的影响可达到米级，甚至会造成卫星信号的失锁，使载波观测量产生周跳。多径效应不仅与接收机所处环境有关，而且还与接收机和卫星之间的相互位置相关，这就使得基站和移动站各自多径效应互不相关，所以不可能通过差分系统消除。因此，对差分定位系统而言，多径效应将成为主要误差来源之一。码差分定位误差的主要原因是多径效应。RTK 的定位误差除了多径效应以外还包括接收机热噪声。

对于 DGPS 系统，为了使基站的天线和移动站的用户能够同时接收到尽可能多的相同卫星信号，就要保障尽可能多的 GPS 卫星位于基站天线的视野以内，因

此，基站的地理位置一般都要高于所有周围的地形以及一些隐蔽的因素<sup>[36-39]</sup>。只有 GPS 天线安装在足够高处，获得一个无障碍并且全方位的空中市场，即在 GPS 星座内的卫星信号辐射面的覆盖之下。对于基站来说，天线的精确测量位置主要用于计算系统的差分改正信息，它的任何差错都会影响到移动用户的导航定位解算。

在系统工作时，基站、移动站单元收发设备的功率可以按照实际的工作距离选择，基站、移动站单元之间的通信方式可以采用无线数据链路方式。一般情况下，影响无线链路工作距离的主要因素有所处地形、发射机和接收机的天线增益、接收机的灵敏度以及传输的功率等。对200km以内小范围通信，其通信距离的主要影响因素是地形，包括建筑物、山峰等，通常可以通过采用高灵敏度接收机或者增加发射功率来克服各种遮蔽因素的影响。同时，可以通过提高天线的增益来增加无线电的辐射功率和接收灵敏度。系统工作时，链路的工作频率可以根据传输的要求来具体选择。一般如果是在地面附近，使用低频段时的传播效果较好。窄带通讯无线数据链路的典型工作频率在150MHz或者450MHz波段，数据的传输速率在9600bps~19.2kbps之间，差分改正信号的天线发射功率在2W到30W之间；而宽带频谱无线数据链路的典型工作频率在900MHz或2.4GHz波段，传输速率在19.2kbps~115kbps之间，差分改正信号的天线发射功率只需要1W或者更低。但是，需要注意的是，各用户系统不能工作在同一个频率上，同时天线也要远离任何反射性因素以及其它无线电设备，降低多径干扰。

## 2.3 本章小结

本章主要是 GPS 的系统概述，介绍了 GPS 定位的相关知识，包括 GPS 星座和星座的覆盖特性、位置精度等。在此基础上，介绍了差分 GPS 定位技术，阐述了常见的差分 GPS 定位算法，同时简单分析了差分 GPS 定位误差。

## 第三章 系统的方案设计

为了满足输电线路厘米级精度的实时在线定位需求，根据上一章的 GPS 系统概述，拟定了基于差分 GPS 的高精度在线定位系统的详细设计方案。该方案主要包括系统的工作模式、器件选择以及各部分之间的通信设计等。

### 3.1 引言

图 3.1 是基于差分 GPS 的输电线路在线监测系统架构图。由图 3.1 可以看到，系统主要包括基准站、移动站以及数据服务器，基准站可安装在变电站中，也可安装在移动站附近的杆塔上，移动站安装在输电线路的导线上。

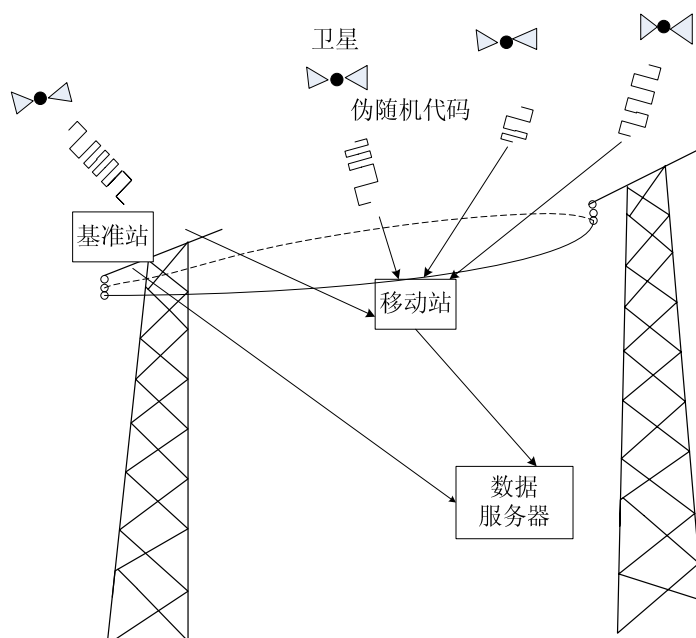


图3.1 基于差分GPS的输电线路在线监测系统架构图

系统三个部分的主要功能分别是：基准站主要完成差分校准信号的获取；移动站通过此差分校准信号来改正自己位置信息，从而得到较为准确的位置信息；终端数据服务器主要负责接收并且观测移动站的情况。在后面的章节将具体介绍系统该部分的通信设计。

### 3.2 工作模式设计

根据图 3.1 所示的输电线路在线监测系统架构图，图 3.2 所示的系统工作模式设计图给出了本次设计的基于差分 GPS 的高精度在线定位系统的具体工作过程。

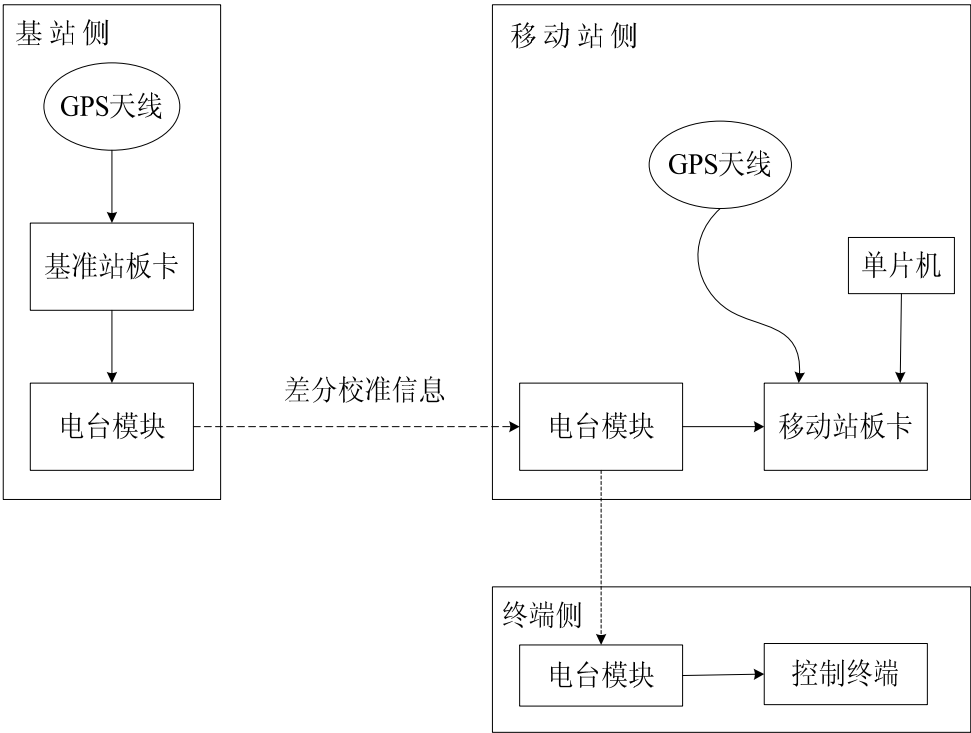


图3.2 系统的工作模式设计示意图

由图 3.2 可以看到系统的具体工作过程如下：

基站侧：基站的天线接收到卫星发送的信号，通过同轴电缆传给基准站板卡，板卡将接收到的基准站卫星测量值和已知的精确位置值进行比较，得到差分校准信息。该差分校准信息将作为移动站位置信息的校正信号，通过电台发送到移动站。

移动站侧：移动站 GPS 天线收到移动站卫星测量值，移动站电台收到基站发送的校准信息，两者经过板卡内部的差分运算规则，输出移动站的准确位置信息。其中，单片机主要用来控制移动站电台的收发。最后，再通过电台将移动站的准确位置信息发送到控制终端。

终端侧：在终端，通过电台收到移动站发送的信息，利用监测软件就可以实时的监测到移动站的位置情况。根据终端测得的情况可以做出相应的判断和调整，以应对突发情况。

3.3 系统器件选择

根据 3.2 节中的系统工作模式设计图可知，本次设计的完整系统主要包括 GPS 天线、主板板卡、电台、单片机、主机以及一些辅助的设备如电源、电平转换等等。

输电线路一般都位于地广人稀的野外，在系统方案设计过程中，应当依据可



靠性、经济性和实用性的原则选择合适的器件。

### 一、GPS 天线

系统设计中，基站采用双频双星外置式测量天线 HX-GS481A，移动站采用双频双星外置式测量天线 HX-GA482A。

#### (1) HX-GS481A

基站采用的 HX-GS481A 涵盖了 GPS L1/L2 和 GLONASS L1/L2，可以满足目前的测量设备多系统兼容的需求，该天线主要技术参数如表 3.1 所示。

表3.1 HX-GS481A技术参数

天线特性	频率范围	GPS L1/L2、 GLONASS L1/L2
	阻抗	50 欧姆
	极化方式	右旋圆极化
	天线轴比	3dB
	水平面覆盖角度	360°
	输出驻波	≤2.0
	最高增益	5.5dBi
	相位中心误差	±2mm
低噪声放大器 指标	增益	40dB
	噪声系数	≤2dB
	输出驻波	≤2.0
	带内平坦度	±1dB
	工作电压	3~8VDC
	工作电流	≤45
	差分传输延迟	< 5ns
结构特性	天线尺寸	Φ190×67.4
	接头形式	TNC 阴头
工作环境	工作温度	-40℃~85℃
	存储温度	-40℃~85℃
	湿度	45%~5%

在实际中，HX-GS481A 被广泛应用在大地测绘、地震监测、海洋测量、桥梁变形监控、航道测量、山体滑坡监测、码头集装箱作业、疏浚测量等场合。

HX-GS481A 的主要特点：采用多馈点的设计方案，实现了相位中心和几何中

心的重合，将天线对测量误差的影响降低到最小；天线方向图波束宽，单元增益高，确保低仰角信号的接收效果，在一些遮挡比较严重的场合依然能够实现正常收星；带有抗多径扼流板，能够有效地降低多径效应对测量精度的影响；带有防水和防紫外线外罩，能为天线长期在野外工作提供有力的保障。

(2) HX-GA482A

移动站采用的 HX-GA482A 是一款双频双星航空天线，低风阻、高增益，具有高灵敏度、高可靠性、低功耗、外观精美、体积小巧等特性，极大地提高了高速运动载体定位的精度，同时它可以配合多种接收机使用。该天线的主要技术参数如表 3.2 所示。

表3.2 HX-GA482A技术参数

天线特性	频率范围	GPS L1/L2、GLONASS L1/L2
	阻抗	50欧姆
	极化方式	右旋圆极化
	天线轴比	≤3dB
	水平面覆盖角度	360°
	输出驻波	≤2.0
	最高增益	3dBi
低噪声放大器指标	增益	36dB
	噪声系数	≤2dB
	输出驻波	≤2.0
	带内平坦度	±1dB
	工作电压	3~8VDC
	工作电流	≤45mA
结构特性	天线尺寸	119.8mm×76.6mm×34.5mm
	接头形式	TNC阴头
工作环境	工作温度	-40℃~85℃
	存储温度	-40℃~5℃
	湿度	45%~5%

HX-GA482A 被广泛地使用在跟踪监测、导航调度、测控以及军事领域等，尤其适用于高速移动的领域和系统，如航空等。

HX-GA482A 的主要技术特点：低噪放增益高，可与较长线缆配接；外罩采用耐高温的塑胶材料，并通过隔热设计保护内部电路；采用整体防水设计，防水等

级达到 IP67。

## 二、主板板卡

主板是本次设计系统的核心，只有合适的主板才能在其基础上得到期望的效果。此次设计的系统，基准站和移动站接收机均准备采用北斗星通的 OEM615 板卡，它拥有动态捕获性能及高精度载波相位解算，定位可达厘米级精度，广泛应用于变形监测系统、高精度测绘、勘探等行业的高精度差分定位。

### (1) 主板 OEM615 引脚介绍

主板的串口总共包含了 20 个引脚。图 3.3 列出了主板其中主要需要连接的部分引脚，可以看到：

1) 引脚 1 接 5V 电源，引脚 2 接 3.3V 电源；13、10、16、18 均为接地脚。

2) 主板的数据传输主要有三个口，图 3.2 中介绍的为本次可能用到的两个口。其中，COM1 口主要用于主板和电脑相连，用于主板的基本设置；COM2 口主要用于数据的传输。系统各部分主板的数据传输情况将在后面具体给出。

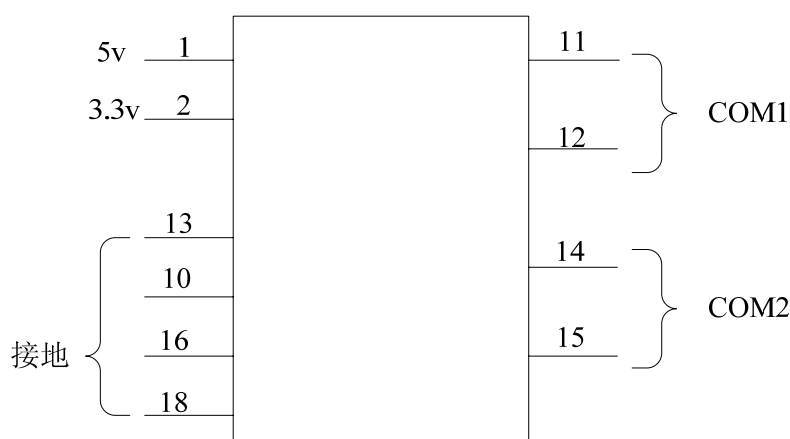


图3.3 主板OEM615引脚示意图

### (2) 主板 OEM615 的功能

主板 OEM615 在系统设计中主要用在基站和移动站，其主要的功能如下：

1) 基站主板主要实现的功能：基站天线接收到卫星发送的信号，通过电缆传给主板，主板内部将接收到的基准站卫星测量值和已知的精确位置值进行比较，得到差分校准信息。

2) 移动站主板主要实现的功能：移动站电台接收到基站发送的差分校准信息，输入主板板卡中，修正移动站天线收到的卫星测量数据，从而改善移动站位置信息，使测量精度达到所要求。即：移动站侧 OEM 板卡输入的数据有两部分：一部分是 GPS 天线收到卫星测到的移动站位置信息，工作情况和基准站相同。另一部分是通过电台接收得到的基站传来的信息，输入 OEM 板卡。两部分输入数据经处理后得到准确的移动站位置信息，再由板卡输出。

(3) OEM615 的技术规格

表 3.3 给出了主板的主要的技术规格，从表中可以看到不同模式下得到的定位精度、定位时间等等情况。

表3.3 OEM615主板技术规格

定位精度	单点	L1	1.5m    RMS		
		L1/L2	1.2m    RMS		
		SBAS	0.6m    RMS		
		DGPS	0.4m    RMS		
	OmniSTAR	VBS	0.6m    RMS		
		XP	0.15m   RMS		
		HP	0.1m    RMS		
	RT-20®		0.2m    RMS		
	RT-2™		1cm + 1ppm   RMS		
第一次 定位时间	热启动		35s		
	冷启动		60s		
重新捕获时间	L1 (典型值)		0.5s		
	L2 (典型值)		1.0s		
数据速率	测量	最高    20Hz			
	定位	最高    20Hz			
时间精度	20ns RMS				
速度精度	0.03m/s RMS				
测量精度		GPS		GLONASS	
		编码	载波	编码	载波
	L1 C/A	4cm	0.5mm	8cm	1.0mm
	L2 P(Y)(L2 P for GLONASS)	8cm	1.0mm	8cm	1.0mm
	L2 C (L2 C/A for GLONASS)	8mm	0.5mm	8cm	1.0mm
动态性能	速度	499m/s			

三、电台

系统设计采用无线电台 TRS 作为数传模块，TRS 通用数传模块是在 TRM 基

础上开发的数传模块，它将 TRM 模块同步通讯模式更改为标准异步模式。模块具有速率高、功率大、频率宽、体积小、易集成等等优点。

### (1) 电台引脚介绍

图 3.4 给出了电台的主要引脚，其具体的定义如表 3.4 所示。在实际应用中，电台的初始化主要使用设置串口，正常通信时使用数据串口。

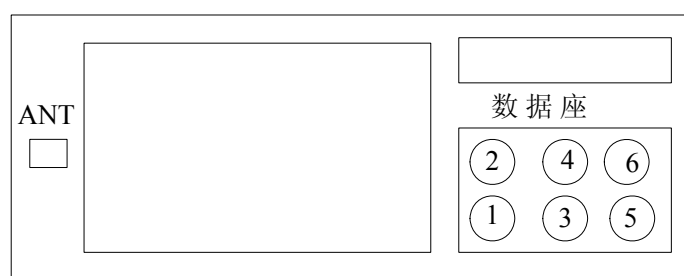


图3.4 电台引脚示意图

在电台的插座背面有四个指示灯，从板角开始依次是：串口、串口、无线、无线。上电时所有四个指示灯都点亮，然后逐个熄灭。如果串口灯一直闪表示 flash 中保存的工作参数丢失；无线灯一直闪表示频率合成器不能锁定；无线灯一直闪表示无线模块不响应设置命令。正面四个指示灯依次为电源 PWR、Com0-RXD、Com0-TXD、CD 指示灯。RXD 灯亮表明模块从串口 Com0 收到数据经无线向空中发射；TXD、CD 灯亮表明模块从空中收到数据经串口 Com0 吐出。

表3.4 电台引脚定义

引脚标号	接口定义		说明
1	GND	电源、数据地	
2	VCC	电源 DC	3.3V
3	RXD1(In)	设置串口	设置数据发送(RS232)
4	TXD1(Out)		设置数据接收(RS232)
5	RXD0(In)	数据串口	无线数据发送(RS232)
6	TXD0(Out)		无线数据接收(RS232)

### (2) 电台通信协议

**数据收发：**从通讯串口输入的发送数据，会忽略开始的一个或多个 0FFh，一个包发送的数据长度建议不要超过 2048 个字节。

**文件收发：**电台模块支持以 Ymodem 协议的打包握手文件传输。Ymodem 协议简介：Ymodem 是使用更大数据块以追求更高效率的调制解调器所使用的一种纠错协议。使用这种 Ymodem 协议的调制解调器以每块 1024 个字节来发送数据。成功收到的块并不会得到确认。而有错误的块将会收到一个 NAK 的否定模式，然后这个块将被重传。Ymodem 类似于 Xmodem-1K，但是它还提供一种批模式。在

这种批模式下可以只用一条命令来发送许多文件。Ymodem 使用循环冗余码校验作为检错的方法。

(3) 电台的技术参数

表 3.5 给出了 TRS 电台的主要技术参数。在使用时需要参考表中的值合理地设置电台参数，保证电台的正常工作。

表3.5 电台的技术参数

供电	DC 3. 3V/5~45V	
电流	发射	<1. 5A
	接收	<60mA
接口	异步 RS232	
空中速率	9600、19200bps	
接口速率	9600、19200、38400bps	
频率范围	410~470MHz	
频率步进	6.25 和 5kHz	
频率稳定性	1.5 ppm, -30℃ 到+60℃	
输出阻抗	50 欧姆	
功率	0.5~2W 可编程设置	
接收灵敏度	-116dBm@19200bps	

参数设置时主要需要注意的是设置发射、接收频率时，要与收发天线的工作频率范围相匹配，否则可能会影响数据通信效果；频偏系数建议使用缺省值，不可随意设置。数据串口速率、空中速率及空中每字节发送时长对应关系如下：

串口速率(10bit/Byte)	空中速率(8it/Byte)	每字节发送时长
9600bps-----	9600bps-----	1ms
19200bps-----	19200bps-----	0.5ms
38400bps-----	19200bps-----	0.5ms

当空中速率设定为 19200bps 时，则模块的最大理论传输速率就是 19200bps，这 19200bit 当中包括了空中传输的同步头、包头、包尾、扰码开销，同步头、包头、包尾根据设定一般不少于 172bit，扰码开销则是一个随实际发送数据包内容决定的变长数据串，可能是几个字节(每字节 8bit)，也可能是十几个字节。

另外，模块还有收发转换时间(每次收发转换大约 7ms)，收发转换次数越多，则此项开销越大，可利用的实际数据发送时间相应减少。所以有如下几点建议：

- 1) 实际发送的数据包应尽可能大一点(宜大于 2048 字节)不宜太小，以便尽量减少收发转换造成的时间浪费；

2) 从串口每秒发送的实际平均数据量 bit 数(每字节 8bit 计算)议不要超过 15000bit, 否则可能造成数据发送积压延时, 甚至丢失。

3) 当发送大数据量的文件时, 建议采用本模块支持的 Ymodem 协议, 以便提高文件数据发送效率和可靠性。

4) 模块数据发送端不能悬空或接+12V: 模块的串口芯片 SP3223 具有自动休眠节电功能, 当模块数据发送端(5 脚)或接+12V 时, SP3223 会进入休眠状态, 模块射频部分会工作, 但串口不会输出数据。因此当模块用作单向接收使用时, 切忌不可 5 脚悬空或接+12V, 最好接到标准串口的-12V 电平上。

#### (4) 电台的功能

由图 3.2 的工作模式设计可以看到, 基站、移动站和终端都需要使用电台, 电台主要承担了地面系统之间的数据接收和发送功能。为避免造成数据错乱, 基站和移动站的电台选用各自的发送频率。三块电台的主要区别是三个部分的电台工作方式不相同。这三部分电台的主要实现的功能是:

1) 基站电台: 基站电台主要将输出的差分信息发送给移动站, 以便移动站校准信号。电台只需要完成发送功能, 因此采用的是单发电台。

2) 移动站电台: 移动站的电台需要完成收和发两项工作。在本次设计的系统中, 电台采用的是半双工的形式, 设计利用单片机来控制电台的收和发。本文的测试平台下暂时不用单片机来控制, 而是利用数据时延来进行收发切换。

3) 终端电台: 在终端, 电台只需实现数据接收功能, 采用单收电台。接收移动站电台发来的位置信息, 最后的 PC 机以便观测。

#### 四、单片机

由于移动站的电台采用半双工的方式, 需要对电台的收发切换进行控制, 可以设计采用单片机控制电台的接收和发送。

本次设计采用 STC 系列单片机。STC 系列单片机具有低功率、高速、超强干扰的特点, 是新一代的 8051 单片机。它的指令完全兼容传统的 8051 单片机, 但是速率却是原来的 8 到 12 倍。最常见的就是 STC 12C5A60S2 单片机, 供电电压 5V。

系统考虑可能的实际环境, 在设计中希望能够尽量选择功率较小的器件, 因此系统设计拟采用 3.3V 的 STC 系列 12LE5A60S2 单片机, 它的工作频率范围是 0~35MHz。STC 12LE5A60S2 单片机和 STC 12C5A60S2 的工作几乎完全相同, 只不过 12LE5A60S2 供电电压是 3.3V。

#### 五、电平转换

主板 OEM615 的电平是 TTL 的, 电台是 232 的, 两者之间如果要通信就需要

在中间加入经过电平转换模块才可以进行正常的通信。系统设计采用 MAX232 芯片来实现电平转换功能。图 3.5 给出了 MAX232 的引脚示意图。

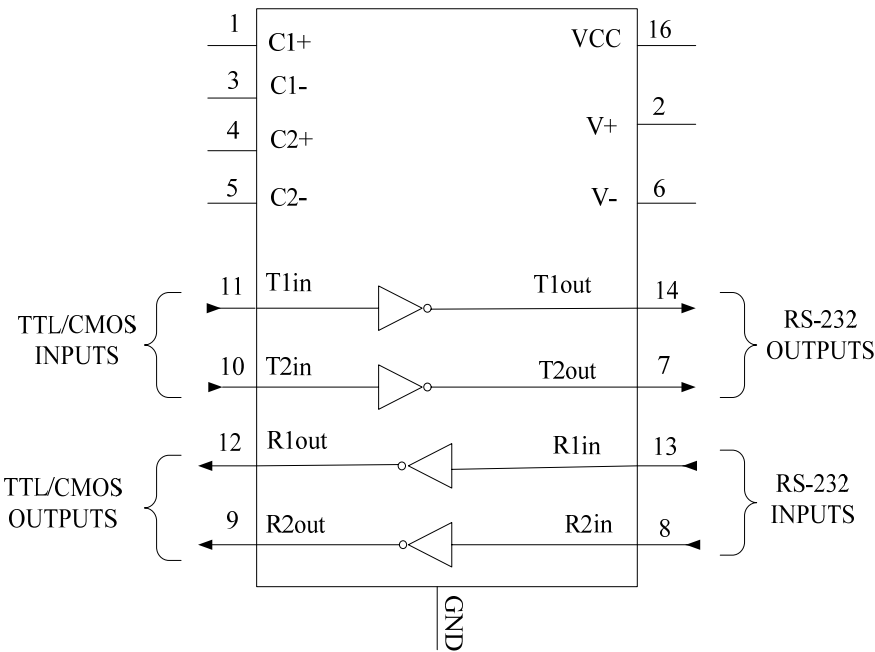


图3.5 MAX232引脚示意图

如图 3.5 所示，当 MAX232 芯片正常工作时，VCC 接 5V 供电即可。从图 3.5 的 MAX232 引脚示意可以看到，MAX232 可以提供两对电平转换引脚，引脚 10 和 11 可以提供 TTL/COMS 到 RS232 的电平转换，引脚 8 和 13 可以提供 RS232 到 TTL/COMS 的电平转换。

六、电源

汇总整个系统选择的各个器件，可以得到如表 3.6 所示的供电需求，据此可以设计具体的电源模块。

表3.6 各部件的供电需求

名称	型号	电压(VDC)		电流		功率(W)
天线	HX-GS481A	3~18		≤45mA		
	HX-GA482A					
主板	OEM615	天线	5	0~100mA		1.3
		主板	3.3			
电台	TR2	3.3/5~45		接收	<60mA	2
				发射	<1.5A	
单片机	STC12LE5A60S2	3.3~2.2				

由表 3.6 知，本次使用的电源电压主要有 5V 和 3.3V。系统设计采用高效率的



开关电源，主要考虑工作效率问题。因为使用线性稳压器件作为电压调节、稳压的器件时，稳压电源线性调整的工作方式会在工作中产生大的热损失，因此，工作效率只有 30%~50%。而开关电源调节器件在工作中是以完全关断或导通的方式，即要么是完全截止使其没有电流流过，要么就是让低通电压开关管流过大电流。因此，开关稳压电源的功耗很低，平均工作效率可以达到 70%~90%。

此次设计的开关电源采用 LM2576 系列芯片的 LM2576-5 和 LM2576-3.3。LM2576 系列开关稳压集成电路是线性三端稳压器件的替代品，它具有较高的工作效率、可靠的工作性能以及较强的输出电流驱动能力，从而可以为系统稳定、可靠的工作提供强有力的保证。

### 3.4 各组成部分设计

基于 3.3 节所选择的器件，本节将详细地介绍系统设计中各组成部分的通信连接情况。

#### 3.4.1 基站设计

基站主要包括天线、主板、电台以及包括电源、电平转化等在内的外围辅助电路。外围辅助电路集成在底板上，底板的设计将在 3.4.4 小节中给出具体介绍。图 3.6 给出了系统正常工作时基站各器件的通信连接设计示意图。

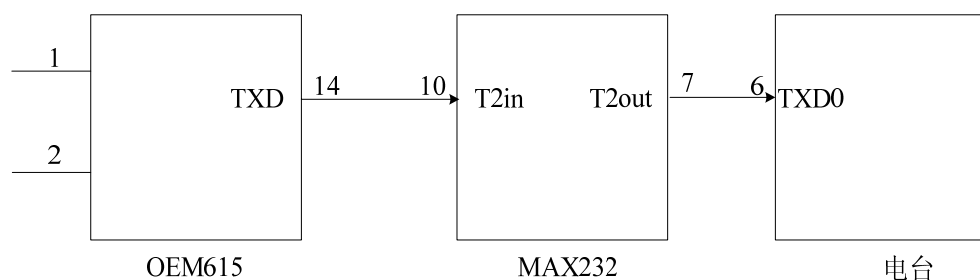


图3.6 基站正常工作的通信连接设计示意图

#### (1) 供电

基站主要需要供电的是主板和电台。主板有两个电源脚，引脚 1 和引脚 2，分别是天线的电源引脚 5V 和主板板卡本身电源引脚 3.3V，电台供电在 5~45V 之间都可以。本次系统设计外部采用 12V 蓄电池给电台和底板供电，经过底板部分的电源模块输出 5V 和 3.3V 来给主板供电。此外，MAX232 的供电是 5V，也是通过底板电源模块实现电压转化后给其供电。

#### (2) 通信过程

如图 3.6 所示，基站正常工作时的具体通信过程：基站主板的天线收到基站卫

星测量值，进入主板。主板板卡通过 COM1 将数据传到电台，即将主板 14 脚的 TXD 引出接到 MAX232 的 10 引脚，MAX232 将电平由 TTL 转换为 RS232 由引脚 7 输出，然后接到电台引脚 6 的 TXD0 上，此时主板的数据即可进入电台，然后通过电台的天线将信号转换成电磁波把数据发送出去，此时就完成了基站完整的数据传输过程。

(3) 主板初始化

在基站部分正常运行之前需要对基站主要器件进行初始化操作，主要是对主板和电台进行初始化操作。对基站主板进行初始化的具体连接设计如图 3.7 所示。

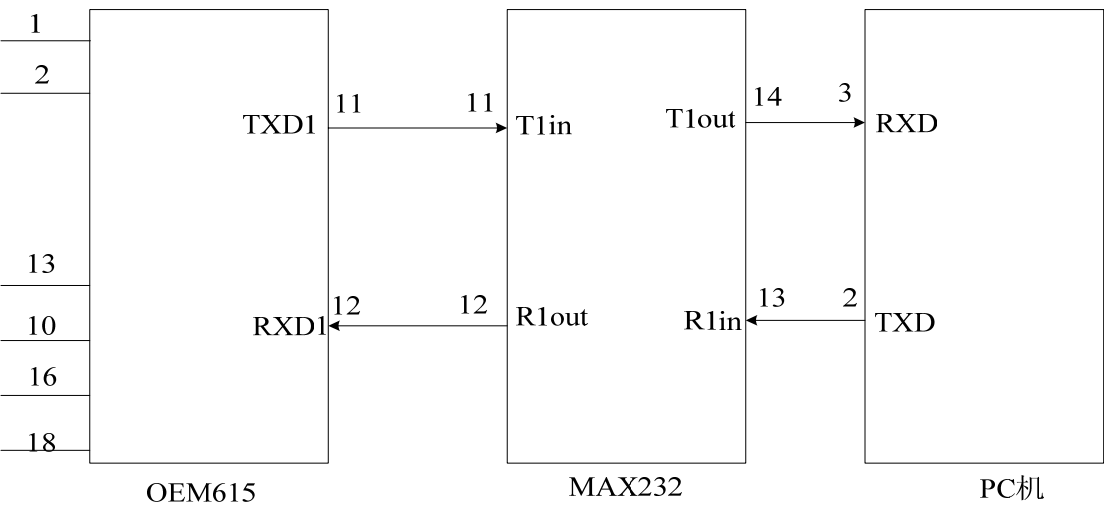


图3.7 主板初始化连接设计示意图

如图 3.7 所示，对主板的初始化主要对主板进行一些命令的控制，希望主板能够按照设置的命令执行相应的操作，从而得到希望的数据结果。这就需要将命令输入主板，对主板初始化的过程中数据传输过程如下：

PC 机输出的命令数据是 232 的，通过 MAX232 的 13 脚输入后经 12 脚输出 TTL 信号进入主板的 12 脚，此时 PC 机的控制命令就输入到了主板中。主板会根据输入的相应控制命令通过 11 脚输出相应的信息，主板 11 脚输到 MAX232 的 11 脚，将 TTL 电平转换成 232 以后通过 14 脚输出到 PC 机，此时，就可以通过电脑查看输出结果就可以知道主板是否正常执行命令，执行是否正确。

(4) 电台初始化

图 3.8 给出了电台初始化操作时的连接设计示意图。电台初始化的过程主要用到电源和设置串口。

1) 基站、移动站和终端三部分的电台输入电压均可在 5~45V 之间。实验过程中使用的 12V 蓄电池来提供所需电压。

2) 在电台初始化的过程使用的是“设置”端口，初始化时将此端口通过 RS232 总线直接和 PC 机相连即可对电台进行命令配置。

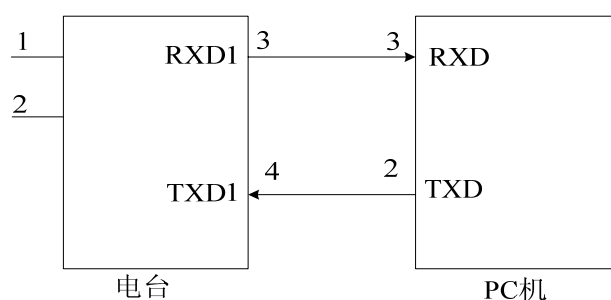


图3.8 电台初始化连接设计示意图

### 3.4.2 移动站设计

移动站和基站类似，也包括天线、主板、电台、底板、电源等等。相比于基站，移动站设计主要是在底板部分多出了一个控制模块，即采用单片机控制主板数据收和发交替进行，从而实现电台收发控制。图 3.9 给出了系统正常工作时移动站的各器件通信连接设计示意图。

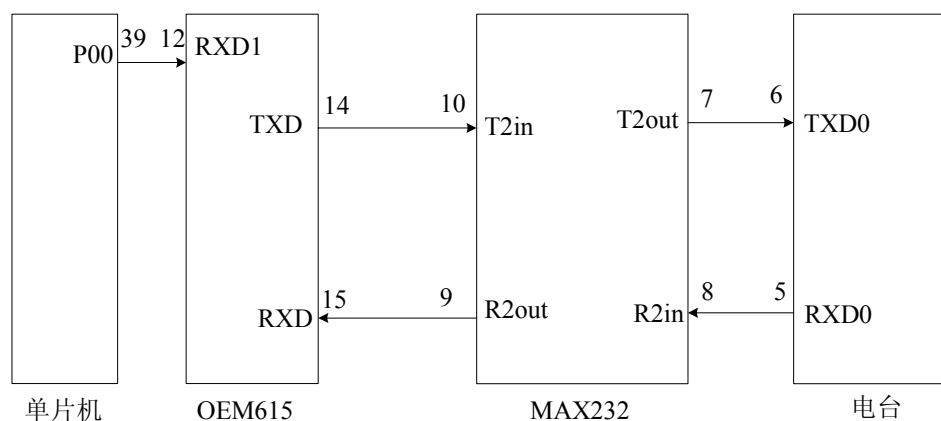


图3.9 移动站正常工作的通信连接设计示意图

#### (1) 供电

和基站类似，移动站的主要也是主板、天线和电台需要供电。供电需求和基站一样，主板天线需要 5V，主板板卡需要 3.3V，电台 5~45V，单片机 3.3V。实验过程当中外部采用 12V 蓄电池给电台和底板供电，底板部分的电源模块输出 5V 和 3.3V 给主板供电。此外，MAX232 的供电需求也是 5V，通过底板电源模块实现电压转化后供电。

#### (2) 通信过程

如图 3.9 所示，系统正行工作时，单片机通过引脚 39 和主板的 COM1 口 RXD1 即引脚 12 相连，可以向主板输入控制命令。某一段时间，单片机控制主板处于数据接收状态，则电台接收基准站发送的差分信息，从引脚 5 经 MAX232 的引脚 8 输入，将 232 电平转化为 TTL 电平由引脚 9 输出接到板卡的引脚 15，然后主板内

部实现数据处理。另一段时间，板卡输出数据，即板卡将处理好的数据通过引脚 14 输出到 MAX232 的引脚 10 将 TTL 电平转换为 232 电平后又从引脚 7 输出到电台的引脚 6，通过电台将数据发送出去。

此次的系统设计中移动站使用的电台是半双工的，设计利用单片机来控制电台的收发工作，使其顺利的实现收发切换。在 RTK 状态下，如果能够保证差分龄期在 5s 以内，就可以获得较高的测试精度。因此，在本文的测试平台下，系统不采用单片机实现对电台的收发控制，而是利用主板的收发、解算等的时延将数据的收发错开实现收发切换。只要保证差分龄期在相应的范围内，即使数据丢包，依然可以满足设计需要的厘米级精度。因此，在此次实际的测试系统平台下暂时不使用单片机控制这一部分。

(3) 初始化

移动站主板、电台的初始化和基站类似，参考图 3.7 所示的主板初始化连接设计示意图和图 3.8 所示的电台初始化连接设计示意图。

3.4.3 终端设计

终端主要是实现监测功能，只需要接收移动站的数据信息，相对来说比较简单，主要包括了电台和 PC 机。

终端只需要给电台供电，同样采用 12V 蓄电池供电。图 3.10 为终端正常工作时的通信连接设计示意图，终端电台接收移动站发送的信息，将信息输出到主机上观察。电台的初始化设计和基站、移动站相同，可以参考图 3.8 所示的电台初始化连接设计示意图，在初始化时需要注意电台频点的设置。

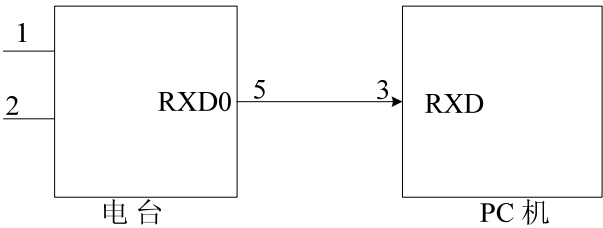


图3.10 终端正常工作的通信连接设计示意图

3.4.4 底板设计

根据前面的系统方案设计可知，要实现系统的正常工作需要根据主板和电台的一些参数以及上述的各部分通信连接设计情况设计外围电路，包括电源、控制、电平转换以及一些辅助的串口等，如图 3.11 所示。图 3.11 所示的底板对基站和移动站都适用，因此两部分采用同样的底板设计。

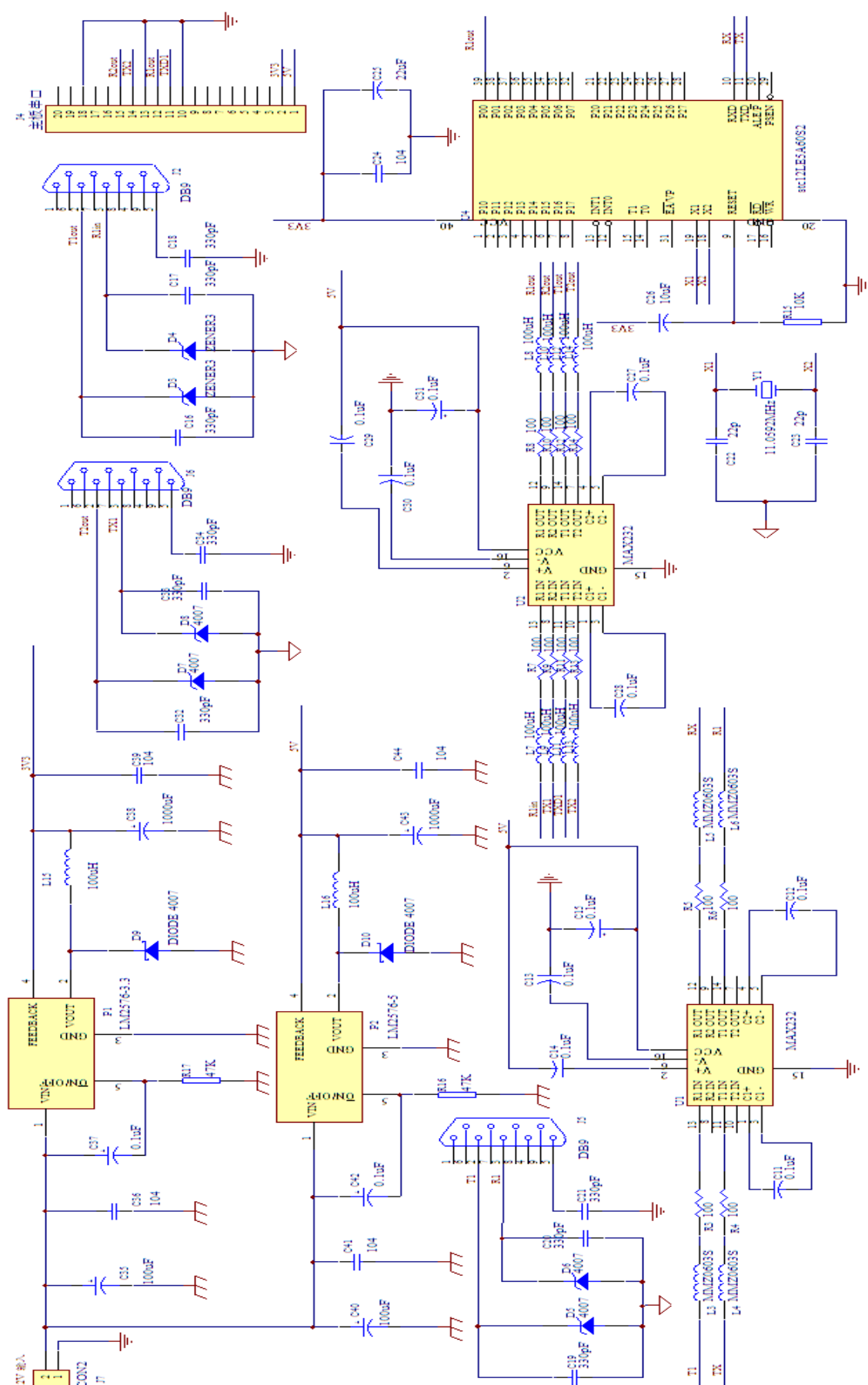


图3.11 底板设计示意图

下面具体介绍图 3.11 所示的底板设计示意图的各组成模块，包括电源模块、控制模块以及电平转换模块等。

### 一、电源模块

本次设计使用的电源电压主要有 5V 和 3.3V。系统设计主要考虑工作效率问题，采用高效率的开关电源。因为使用线性稳压器件作为电压调节、稳压的器件时，稳压电源线性调整的工作方式会在工作中产生大的热损失，因此，工作效率只有 30%~50%。而开关电源调节器件在工作中是以完全关断或导通的方式，即要么是完全截止使其没有电流流过，要么就是让低通电压开关管流过大电流。因此，开关稳压电源的功耗很低，平均工作效率可以达到 70%~90%。

系统设计的电源模块采用 LM2576 系列芯片的 LM2576-5 和 LM2576-3.3。LM2576 系列开关稳压集成电路是线性三端稳压器件的替代品，它具有较高的工作效率、可靠的工作性能以及较强的输出电流驱动能力，从而可以为系统稳定、可靠的工作提供强有力的保证。图 3.12 是具体的电源模块设计示意图。

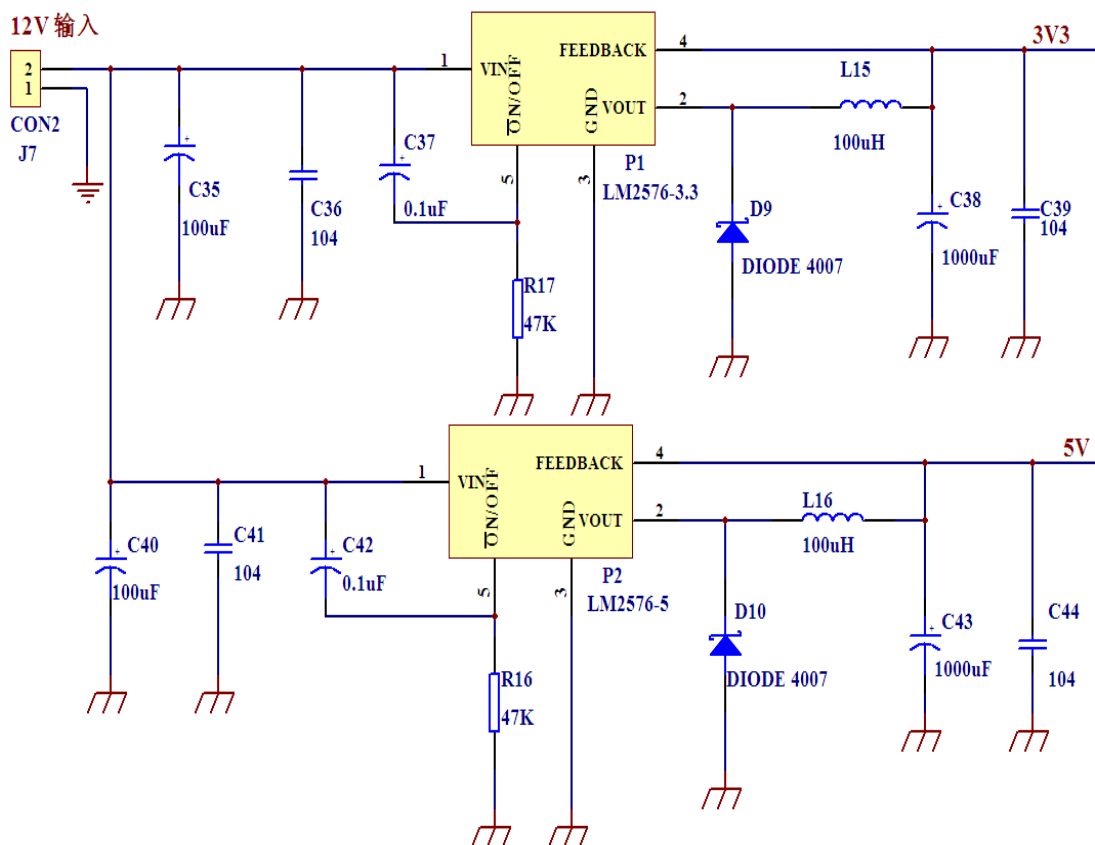


图3.12 电源模块设计示意图

如图 3.12 所示，电源设计采用芯片 LM2576-3.3 和 LM2576-5，输入采用 12V 蓄电池。当输入 12V 时，LM2576-3.3 支路输出电压 3.3V，LM2576-5 支路的输出电压为 5V，利用这个部分就可以为系统的主要器件供电。

## 二、控制模块

由于移动站的电台采用的是半双工的工作方式，需要对电台的收发切换进行控制，设计采用单片机控制电台的接收和发送。系统考虑可能的实际应用环境，希望尽量选择功率较小的器件，因此系统设计拟采用3.3V的STC系列12LE5A60S2单片机，它的工作频率范围是0~35MHz。STC12LE5A60S2单片机和STC12C5A60S2的工作几乎相同，只不过12LE5A60S2供电电压是3.3V。

由于在后面实际的测试平台下暂时不使用底板上这部分设计的控制模块，在这里不作介绍，同时在电平转换模块也暂不介绍与单片机相连部分。

## 三、电平转换模块

我们已经知道，主板板卡OEM615的电平是TTL的，电台是232的，两者之间如果要想实现通信就需要在中间加入经过电平转换模块才可以进行正常的数据通信。图3.13是底板上设计电平转换模块部分，图中J4是主板的连接串口，本次设计中主要使用的是主板的COM1和COM2口。

其中，主板的COM1口与图3.13中J4的引脚11和引脚12相连，它主要和计算机之间进行通信，两者之间的通信过程如下：

计算机→主板：计算机发送指令经J2的引脚3接到电平转换芯片MAX232的引脚13，将232数据转换成TTL数据，再从MAX232的引脚12输出到与主板引脚12相连的J4串口的引脚12，此时计算机的命令就可以进入主板。

主板→计算机：主板收到计算机的指令以后，需要按照计算机的指令做出相应的操作，输出相应的数据。同样，主板输出的数据还是TTL的，需要先转换才能输到计算机。主板的数据从主板引脚11输出与之相连的J4的引脚11然后接到MAX232的引脚11，经过转换后数据从引脚14输出后接到J2的引脚2，然后通过串口线与计算机相连，在计算机上观察处理结果。

此外，主板的COM2口与图3.13中J4的引脚14和引脚15相连，它主要和电台连接，实现主板和电台的通信。两者之间的通信过程如下：

主板→电台：在基站，主板只需要将基站的差分信息发送到移动站，这就需要通过电台来通信。主板输出的数据还是TTL的，需要先转换才能输到电台。主板的数据从主板COM2口输出到J4的引脚14，然后接到MAX232的引脚10，数据经过转换后从引脚7输出接到J6的引脚2，然后通过串口线和电台相连，通过电台天线将数据发送出去到移动站。同时，在移动站，电台需要将移动站的位置信息数据发到终端，这一过程的数据流向和此过程一样。

电台→主板：在移动站，电台收到数据，需要将数据传给主板，此时，数据经J6的引脚3接到电平转换的引脚8，将232数据转换成TTL数据，从引脚9输

出接到 J4 的引脚 15，最后接到主板的引脚 15，此时主板就可以收到电台传过来的数据信息。

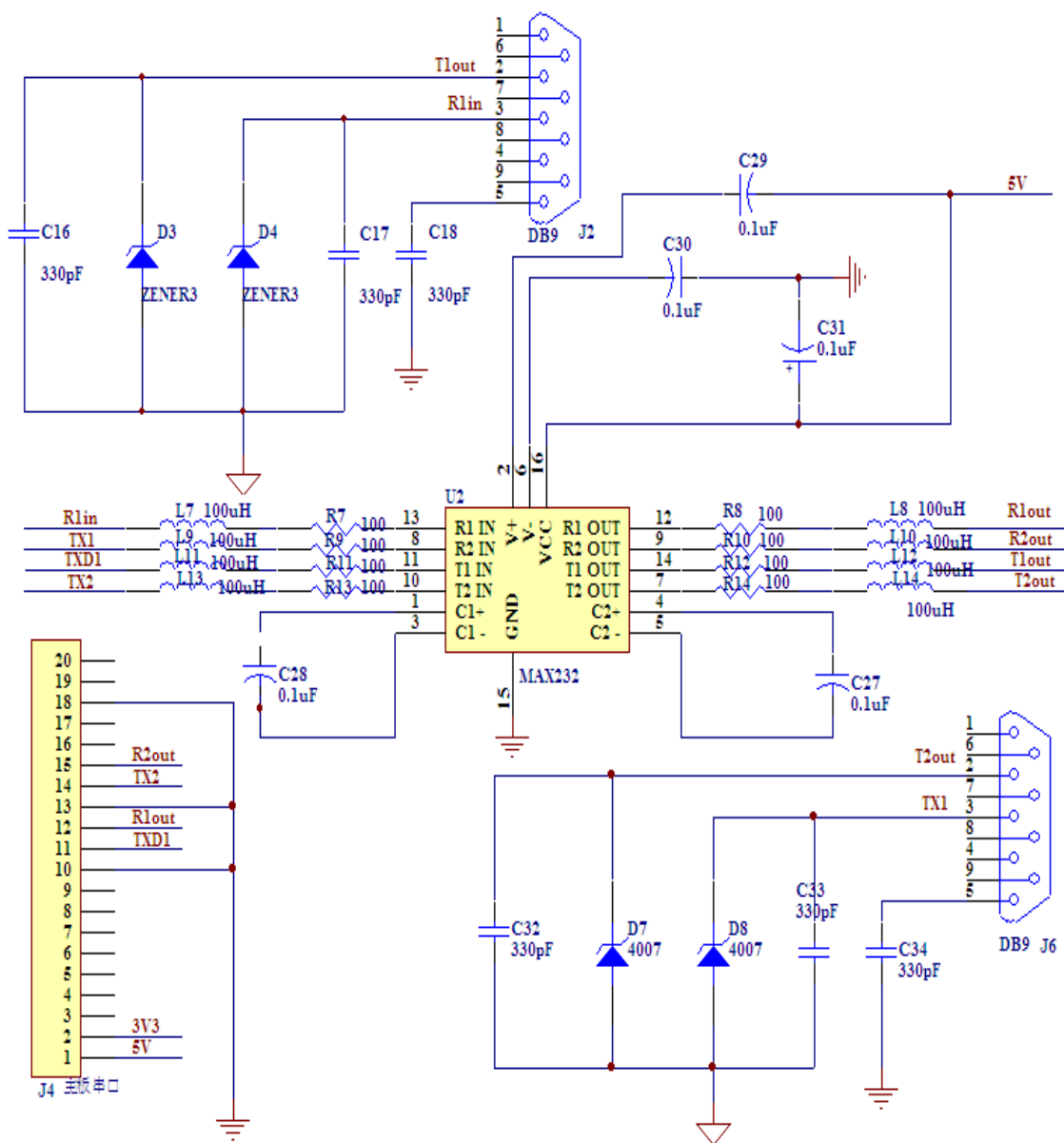


图3.13 电平转换模块设计示意图

### 3.5 本章小结

本章详细地介绍了此次设计的基于差分 GPS 的高精度在线定位系统的设计方案。首先介绍了基于差分 GPS 的输电线路在线监测系统架构，然后介绍了本次设计的系统工作模式，在此基础上给出了系统组成器件的具体介绍。根据所选择的器件，介绍了系统基站、移动站以及终端的通信连接设计。最后介绍了包括电源模块、电平转换模块等在内的外围电路设计。



## 第四章 系统的测试和分析

在上一章中介绍了系统的外围电路设计，根据此设计完成了电路板的制作和调试，确保底板正常工作，为系统提供外部支持。由此就可以根据系统的通信连接设计初步搭建系统的测试平台了。

### 4.1 系统测试平台的构建

#### 4.1.1 测试环境介绍

本次设计的系统主要希望用在输电线路路上，而输电线路一般都位于地广人稀的野外，考虑到此设计系统的实际应用环境，故搭建的系统测试平台选在空旷无遮挡的场地。

测试还需要考虑到以下几点。首先，由上一章描述的系统工作情况可以知道终端的观察非常简单，只需要观察收到的移动站位置信息，因此可以在测试的时候选择两种平台，一种是不加终端直接在移动站观测的测试平台，另外一种是在加入终端在终端观测的测试平台。这样做的主要原因有：

(1) 由于采用在终端观察的方式时，终端的接收非常简单，没有办法灵活的改变数据的输出格式。这是因为电台 2 的一个数据端口已经被占用，没有办法接收其他信息，因此不能实现电台远程交互。如果想要改变输出数据的格式就需要对移动站重新进行初始化配置，操作比较麻烦。

(2) 如果在终端同时进行交互操作时数据量非常大，由于电台空传率和带宽的限制，有可能没有办法承受。

因此，在实际的测试过程中，选择两种测试平台，分别是不加终端构建的测试平台和加入终端构建的测试平台。

#### 4.1.2 测试平台的搭建

加入终端构建的测试平台主要包括基站、移动站以及终端三部分，其搭建完成以后各个部分的示意图如下。

##### 一、基站

图 4.1 给出了所搭建的测试平台下基站部分的连接示意图。由图 4.1 系统基站测试示意图可以看到基站主要包括蓄电池、天线、主板、底板、电台 1 等。



图4.1 基站测试示意图

(1) 供电。采用 12V 蓄电池，为基站电台和底板供电，主板则是通过底板电源模块实现电压转化给其供电。

(2) 天线。主板和电台都有天线相连，HX-GS481A 通过 TNC 转 MCX 转接线接入主板(主板右侧位置)，电台 1 通过 MMCX 转 TNC 转接线和天线相连(电台左侧位置)。

(3) 通信。主板和电台 1 之间通过 232 线的相连，即主板的 COM2 口和电台 1 的数据接口相连，从而利用电台将数据发送到移动站。

## 二、移动站

图 4.2 给出了所搭建的测试平台下移动站部分的连接示意图。由图 4.2 移动站测试示意图可以看到移动站的具体组成，和基站类似，移动站主要也包括了蓄电池、天线、主板、底板、电台 2 等。

(1) 供电。采用 12V 蓄电池，为移动站电台和底板供电，主板则是通过底板电源模块实现电压转化给其供电。

(2) 天线。移动站的天线采用 HX-GA482A，更加适合移动站位置移动的特点。HX-GA482A 通过 TNC 转 MCX 转接线接入主板(左侧)，电台 2 通过 MMCX 转 TNC 转接线和天线相连(右侧)。

(3) 通信。电台 2 采用半双工方式，它接收基站发送的数据信息，同时将处理好的数据发送给终端，电台 2 的数据口和主板 COM2 之间通过 232 线相连实现数据的通信。



图4.2 移动站测试示意图

### 三、终端

图 4.3 给出了所搭建的测试平台下终端部分的测试示意图。由图 4.3 终端测试示意图可以看到，终端的建立比较简单，主要包括电台 3 和 PC 机。电台 3 通过串口线和 PC 机直接相连，通过 PC 机上的软件就可以直接观察移动站的定位信息。



图4.3 终端测试示意图

4.2 系统初始化

在搭建完成了系统的测试平台以后，就可以开始正式的测试。在此之前，需要对系统的主要器件进行初始化操作，主要是对电台和主板的初始化。下面将详细地介绍电台和主板的初始化过程。

4.2.1 电台的初始化

一、连接

由表 3.4 电台的引脚定义可以看到，电台模块连接时主要包括电源接口、设置串口和数据串口。电台初始化的过程主要用到的就是电源和设置串口。

(1) 基站、移动站和终端三部分的电台输入电压均可在 5~45V 之间。本次实验过程中使用的 12V 蓄电池来供电。

(2) 电台最主要的就是“设置”和“数据”两个端口。在电台初始化过程使用的是其中的“设置”端口，初始化操作时将此端口通过串口线直接和 PC 机相连即可。

二、参数设置

表 4.1 给出了电台需要设置的几个主要工作参数。

表4.1 电台工作参数

收发频率	435MHz (410-470MHz 可调)
异步串口速率	19200 (9600、19200、38400 可调)
空中速率	19200bps (9600、19200bps 可调)
数据头长度	18 个 (10-18 个可调)
发射功率	L (H、L 可调)
调制频率	128 (1-255 可调)

需要根据实际环境和不同应用需求来具体设置以上某些参数，具体的操作如下：

(1) 打开超级终端，将超级终端属性里的端口设置的串口速率每秒位数改为“38400”。

(2) 在超级终端的窗口内输入命令“@@Setup” (注意大小写)，会出现表 4.2 所示的菜单栏，修改时先输入菜单号后回车，在输入新参数。

例：修改发送频率，先输入“1”回车，输入频率值后回车(注意：输入频率时有效数据到小数点后四位数字)。设置完成后要保存按“S”，这时会出现“Save

changes to EEPROM? ” ，按“Y”确认，然后重启动按“E” 。参数设置时用到字母 H、L、O、R、S、E 都需要大写。如果长时间不进行参数设置操作，就会超时退出设置状态。如果想要继续进行参数设置就需要重新输入“@@Setup”设置命令进入设置状态。

表4.2 超级终端设置菜单栏选项

菜单号	当前参数	说明
1.	发送频率<459.8375MHz >	设置模块发送频率
2.	接收频率<450.8375MHz >	设置模块接收频率
3.	发射功率<L>	设置模块发射功率(L 或 H)
4.	同步头长度<18 个>	设置模块同步头个数(10—18
5.	串行口速率<19200>	设置串口速率(9600/19200/38400)
6.	调制频偏<128>	设置调制频偏系数(1—255 可调)
7.	手动设置无线模块	注意：该命令为电台测试模式，用户不要使用
O.	Set to Default.	设置模块为缺省工作参数
R.	Reload from EEPROM.	重新独处模块参数
S.	Save changes to EEPROM.	保存模块工作参数
E.	Restart.	重启模块内程序
>>		

(3) 在以上的参数设置时还需要注意以下几点：

首先，无线通讯串口速率。无线通讯串口速率只能是 38400、19200、9600 三选一。

其次，功率的选择。如果在室内测试，电台的发射功率设为 L，从而避免信号堵塞；如果在室外测试，电台的发射功率设为 H。

最后，电台的频率设置。为避免造成数据错乱需要注意区分三个电台的频率，在使用中基站和移动站电台选用各自的发送频率。设置发射、接收频率时、要与收发天线的工作频率范围相匹配，否则可能会影响数据通信效果。两种测试平台下，电台频率设置如下：

1) 不加终端的测试平台下，当系统正常工作时，假设基站和移动之间的通信采用 459.8375MHz，具体电台的频率配置如下：

- 电台 1 (基站):  
    发送频率 459.8375MHz  
    接收频率 450.8375MHz
- 电台 2 (移动站):  
    发送频率 466.8375MHz  
    接收频率 459.8375MHz

2) 加入终端的测试平台下，当系统正常工作时，系统的三部分电台的收发频

率需要分开以避免造成数据错乱，电台的频率选择如下：

电台 1 (基站):	发送频率	459.8375MHz
	接收频率	450.8375MHz
电台 2 (移动站):	发送频率	466.8375MHz
	接收频率	459.8375MHz
电台 3 (终端):	发送频率	435.8375MHz
	接收频率	466.8375MHz

#### 4.2.2 主板的初始化

测试前，主板初始化过程主要是往 OEM615 主板里面预先输入一些简单的配置命令，使主板根据需要输出不同的数据，下面将具体介绍基站和移动站的配置。一般情况下基站的配置比较固定，移动站的配置相对于基站来说比较灵活，需要根据实际需求来变化。

##### 一、基本命令介绍

(1) 基站正常工作前需要事先知道基站的准确位置。基站的准确位置可以通过两种办法得到，一种是通过大地测量仪直接测量得到，另外一种是通过提前预留一段时间来进行连续采样处理，中间不断电，记录数据，然后将记录的数据事先进行处理，近似作为其精确的位置信息，如可以取 0.01 小时即约 36s 时间内测到的基站位置平均值作为基准站坐标，将此坐标作为基准站的固定位置信息，此信息包括基站的纬度、经度和高程。

格式：POSAVE 0.01

(2) COM1 口和计算机通信，其波特率选择要和计算机串口波特率选择相一致。假设波特率设为 38400。

格式：COM COM1 38400

(3) 在基站，主板 COM2 口和电台 1 通信，传输差分校准信号。假设 COM2 口波特率设为 38400。需要注意的是，移动站 COM2 口在配置时要和此波特率相一致两者之间才能通信，移动站主板的 COM2 口和电台 2 模块相连，接收电台 1 发送的差分校准信号。

格式：COM COM2 38400 N 8 1 N OFF OFF

(4) 基站只需要向移动站发送差分校准信号，配置 COM2 收数据为无，发数据 RTCA 格式。该指令配置端口在特定模式下去检测数据或输出数据。

格式：INTERFACEMODE COM2 NONE RTCA OFF

移动站有两种测试情况，当不加入终端，COM2 收数为 RTCA 格式，直接在

移动站观察，设发数据为无，接收差分数据。

格式：INTERFACEMODE COM2 RTCA NONE OFF

当加入终端时，配置 COM2 既收也发，接收差分数据，发送移动站校准后的位置数据。

格式：INTERFACEMODE COM2 RTCA NOVATEL OFF

(5) 许多不同类型数据用 LOG 指令来记录。

在基站发送差分信息：

格式：LOG COM2 RTCAOBS2 ONTIME 1 // 实时记录观测数据端口

格式：LOG COM2 RTCAREF ONTIME 5 // 实时记录参考数据端口

在移动站发送校正后的位置信息：

格式：LOG COM2 GPGGALONG ONTIME 1

LOG COM2 BESTPOSA ONTIME 1

(6) COM1 口发送最佳位置信息，1 秒/次

格式：LOG BESTPOSA ONTIME 1

(7) 在初始化配置过程完成以后，一定要保存配置，这样主板才能按照既定的命令来工作。

格式：SAVECONFIG

(8) 在改换配置前可以先执行 FRESET 操作，该命令可以清除被保存在非易失性内存中的数据，以免出现数据错误。

## 二、配置

本次测试构建了两种测试平台，即不加终端和加入终端的两种测试平台，两种平台下电台频率设置如下：

(1) 不加终端时，当系统正常工作，基站主要实现差分校准信号的输出，数据只发不收。在移动站数据只收不发，观测差分校正以后的移动站定位信号。基站和移动初始化的配置如下：

基准站配置：

POSAVE 0.01

COM COM1 115200

COM COM2 38400 N 8 1 N OFF OFF

INTERFACEMODE COM2 NONE RTCA OFF

LOG COM2 RTCAOBS2 ONTIME 1

LOG COM2 RTCAREF ONTIME 5

LOG BESTPOSA ONTIME 1

SAVECONFIG



移动站配置:

```
COM COM1 38400
COM COM2 38400 N 8 1 N OFF OFF
INTERFACEMODE COM2 RTCA NONE OFF
LOG BESTPOSA ONTIME 1
SAVECONFIG
```

(2) 当加入终端时, 基站的配置不变, 移动站的配置需要改变, 这是因为移动站的配置直接关系到终端的输出结果, 需要根据实际期望来配置。

由于移动站电台的工作半双工方式, 在测试过程中直接利用时延来进行收发切换, 可以将移动站配置稍作改变, 改为:

```
LOG COM2 GPGGALONG ONTIME 2
LOG BESTPOSA ONTIME 1
```

即移动站电台每2s发一次数据, 每1s收一次数据, 假设电台在整数秒时收数据, 将收到的数据传给主板进行解算, 此时从收数据到数据解算然后将数据再发送出去这一过程会出现一定的时延, 时延大概在200ms以内。当主板完成数据解算打算将数据再发出去时, 由于时延的关系, 此时不在整数秒, 即此时电台没有执行收数据操作, 可以实现收发切换, 将解算完成的数据包发送出去。

移动站初始化完整的配置如下:

```
COM COM1 38400
COM COM2 38400 N 8 1 N OFF OFF
INTERFACEMODE COM2 RTCA NOVATEL OFF
LOG COM2 GPGGALONG ONTIME 2
LOG BESTPOSA ONTIME 1
SAVECONFIG
```

### 4.3 测试结果分析

在完成了电台和主板的初始化配置以后, 就可以搭建完整的系统测试平台进行测试了。此次采用两种测试平台, 分别是不加终端和加入终端的测试平台, 下面介绍这两种测试平台下的测试结果。

#### 4.3.1 不加终端的测试平台

测试时搭建的系统测试平台如图4.1和图4.2所示。测试时, 在图4.2所示的主板另一个串口COM1接串口线和计算机相连, 就可以直接在计算机上观察此时的移动



站测试情况。测试时，采用两种软件来观察测试结果。

### 一、使用软件 NovAtel Connect™ 1.2.0

#### 1. 将移动站安放在初始点，设为位置 1。

打开软件NovAtel Connect，选择此时的PC COM Port为 COM5，选择Settings波特率38400，此波特率和配置主板COM1口波特率相匹配。连接完成以后就可以从该软件上可以清楚地看到此时得到的移动站的一些基本情况，如图4.4所示，包括移动站的收星情况、移动站的位置、误差、DOP等。

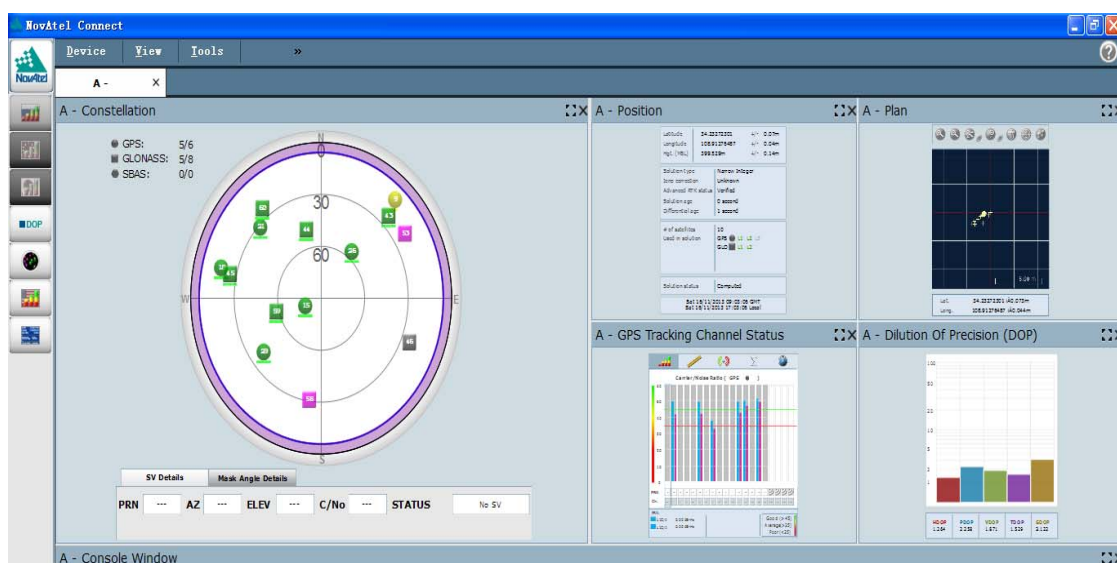


图4.4 位置1处移动站测试结果图

下面给出上图中的一些主要的观测结果。

#### (1) 收星-constellation window

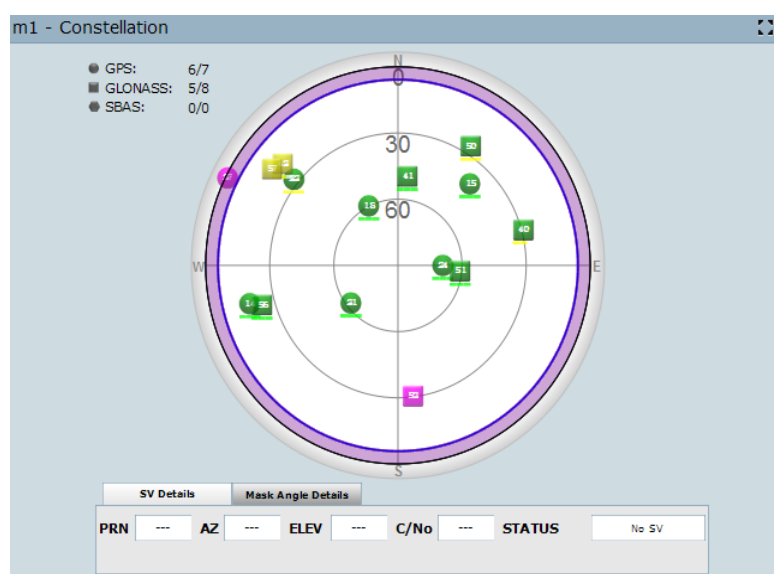


图4.5 constellation window

图4.5 constellation window给出了位置1处移动站的收星情况示意图。根据卫星

定位系统的基本原理可知，一般情况下，用户在地球上任意的一个地区、近地面上空任意一点同时观测4颗及以上的卫星，就可以为用户提供高定位精度、实时、全天候连续的三维位置等。

从图4.5中可以看到移动站总共收到15星，其中参与解算的卫星中GPS有6颗，GLONASS有5颗。显然，此时系统测试平台位于比较好的观测环境下。

(2) 位置- position window

图4.6 position window 1给出了移动站具体的数据信息，包括位置、定位状态、解算时间、差分龄期、参与解算的卫星等等。



图4.6 position window 1

从图4.6 position window 1得到的数据可以知道：

- 1) 此时系统测到移动站的纬度为34.23274727，经度为108.91273832，高程为402.920m，此时的纬度、经度、高程的测试精度即误差为±0.01m、±0.01m、±0.02m。如果系统处于单点定位时，此三项误差数据将在米级范围变化；而此时系统处于差分状态时，此三项误差数据都在厘米级范围变化。因此，在观测的过程中可以直接通过观察此误差数据来大致判断系统的状态。经过长时间的观察，发现此误差一直在厘米范围内变化，说明此时系统工作在差分状态，误差达到厘米级，系统测试平台满足设计需求。
- 2) 此时定位类型NARROW INT，表明此时的系统处于RTK状态下，解算时间为0s，差分龄期为1s。一般情况下，差分龄期在10s以内，系统可以获得比较好的测试精度。
- 3) 图4.6还给出了此时参与解算的卫星数，有11颗，和图4.5constellation window所示的卫星数相符。因此，可以直接通过观察此窗口显示的参与解算卫星数来判

断此时系统的观测环境是否良好。

### (3) 位置-plan window、plan view all window

移动站的位置在软件上还可以通过图4.7 plan window 1和图4.8 plan view all window 1给出。一般，每个用户都有自己的plan window，它对已经建立了世界各地的基站连接的用户是非常有用的；用户也可以通过窗口可以在每个地方来查看位置情况。而plan view all window可以使用户在同一个时刻来查看所有的连接，它有一个独立的标签。从图中可以看到plan view all window和plan window所显示的用户位置非常相似，因此，有时候可以用它替代plan window。

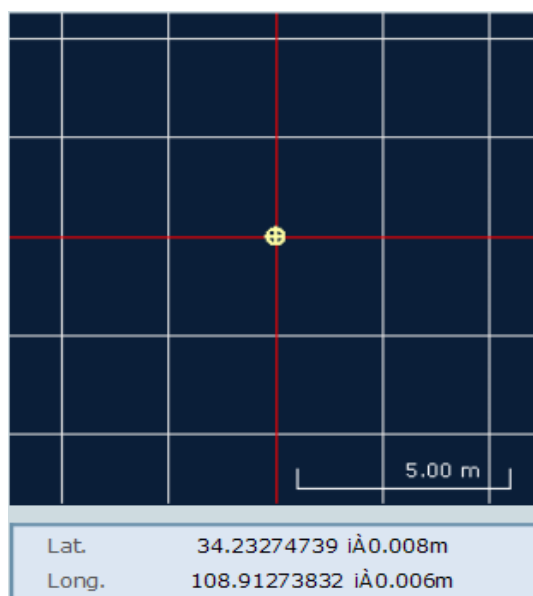


图4.7 plan window 1

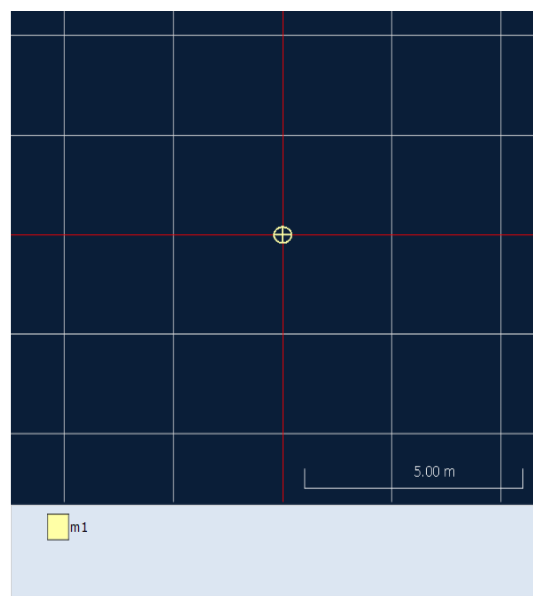


图4.8 plan view all window 1

观察图4.7的plan window 1和图4.8的plan view all window1可以看到：

1) 图4.7的plan window 1同样给出了此时移动站具体位置信息：纬度34.23274739、经度108.91273832，以及纬度和经度的误差，分别为0.008m和0.006m。经长时间观察，可以看到此时的系统测试平台下的测量精度达到厘米级。

2) 同时可以看到，图4.7的plan window 1和图4.8的plan view all window1所显示的移动站的位置几乎一样，可以替代。

3) 比较图4.6和图4.7、图4.8可以看到，图4.6给出的是移动站具体的数据信息，包括位置、定位状态、解算时间、差分龄期、参与解算的卫星等等，而图4.7、图4.8除了给出移动站位置的具体值外，还直观地给出了此时移动站在平面里的位置。对于位置变化的移动站而言，移动站在平面上的具体移动情况可以从图中直接观察，这对于监测突发位置变化会更加方便。

### (4) 精度因子- Dilution Of Precision window

图4.9给出了此时卫星精度因子的值，DOP的值主要反映了卫星的空间几何分布，它是轨道参数和星座大小的函数。

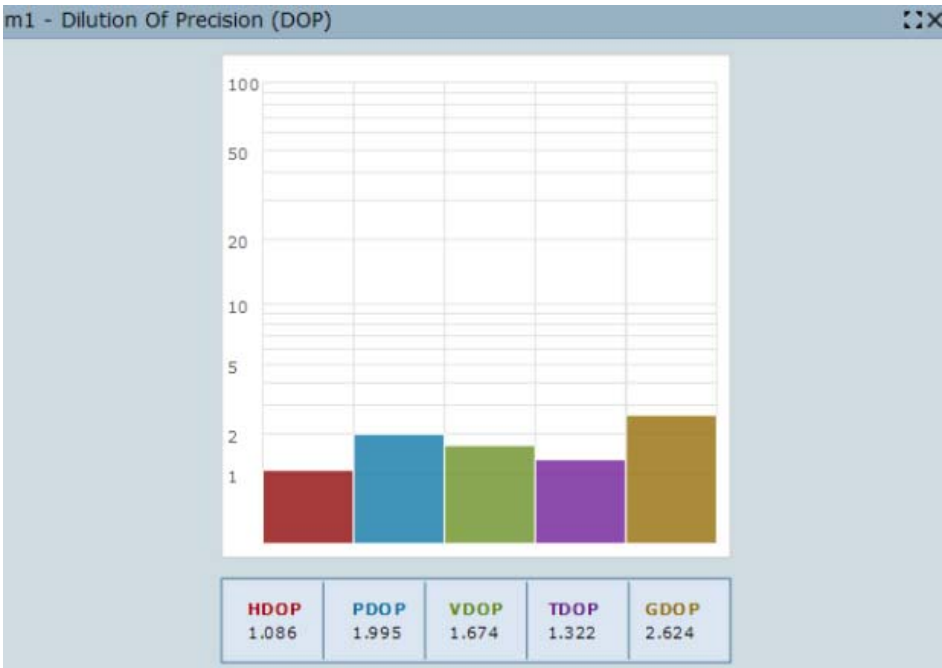


图4.9 Dilution Of Precision window 1

从图4.9可以看到此时的平面位置精度因子HDOP为1.086，空间位置精度因子PDOP为1.995，高程精度因子VDOP为1.674，接收机钟差精度因子TDOP为1.322，几何精度因子GDOP为2.624。

(5) 跟踪状态- tracking status window

图4.10给出了GLONASS L1的数据，图4.11给出了GPS L1C/A和L2P(Y)的数据，从图中可以很清楚看到载波/噪声比。一般情况下，载波/噪声比大于35，当其大于45时说明效果很好，但是如果低于35，则说明此时的效果很差。

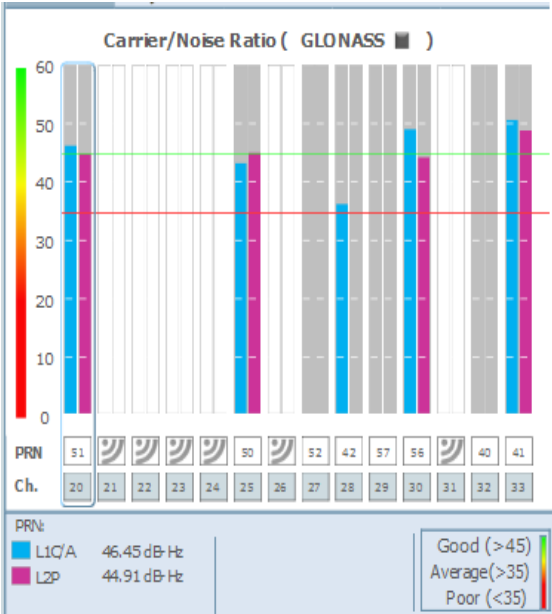


图4.10 tracking status window-GLONASS

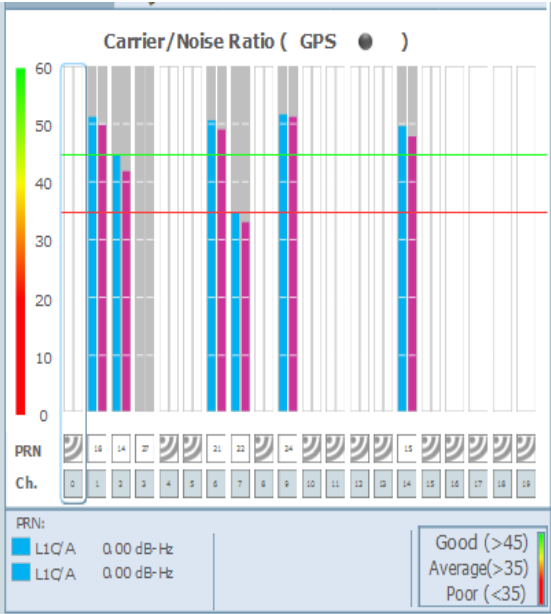


图4.11 tracking status window-GPS

从图4.10和图4.11可以看到，本次系统GPS和GLONASS两种跟踪状态下的载波

/噪声比基本上都在35以上，测试效果比较不错

#### (6) Advanced tracking

进一步，图4.12 Advanced tracking window给出了系统的各种参数，包括信道、伪随机噪声、状态、多普勒频移等等，根据这些参数可以很好的了解目前系统测试平台所处的状况。

Channel	PRN	State	Doppler	CNO	Residual	Lock Time	Reject Code	Sys-Corr	Signal
28A	42	Steering	2423.96				NA	GLO-P	L1C/A
32A	40	Steering	-1917.41				NA	GLO-P	L1C/A
1A	18	Lock	1290.83	51.2555	0.329264	940.01	Good	GPS-P	L1C/A
1B	18	Lock	1005.84	50.2862		937.78	L2 Observ...	GPS-S	L2P(Y)
2A	14	Lock	2316.97	47.4198	-0.277488	55.02	Good	GPS-P	L1C/A
2B	14	Lock	1805.43	41.1977		54.3	L2 Observ...	GPS-S	L2P(Y)
6A	21	Lock	-1013.41	50.5165	0.386425	409.63	Good	GPS-P	L1C/A
6B	21	Lock	-789.671	49.4206		408.9	L2 Observ...	GPS-S	L2P(Y)
7A	22	Lock	2518.15	42.4314	-1.58218	55.98	Good	GPS-P	L1C/A
7B	22	Lock	1962.2	36.11		55.28	L2 Observ...	GPS-S	L2P(Y)
9A	24	Lock	-123.016	51.4881	-0.615065	2465.15	Good	GPS-P	L1C/A
9B	24	Lock	-95.8553	51.3783		2448.3	L2 Observ...	GPS-S	L2P(Y)
14A	15	Lock	-2389.69	50.161	1.24608	736	Good	GPS-P	L1C/A
14B	15	Lock	-1862.1	48.1512		735.28	L2 Observ...	GPS-S	L2P(Y)
20A	51	Lock	764.89	45.7094	-1.25285	388.65	Good	GLO-P	L1C/A
20B	51	Lock	594.917	43.2356		387.952	L2 Observ...	GLO-S	L2P

图4.12 Advanced tracking window

#### 2. 将移动站安放在位置 2、位置 3、位置 4 处

将移动站依次安放在位置2、位置3、位置4处，此时测试系统得到的移动站位置等的具体信息如下：

##### (1) 位置- position window、Dilution Of Precision window

图4.13~图4.15分别给出了位置2、位置3和位置4处测试得到的移动站位置相关信息。



Latitude	34.23275847	+/- 0.01m
Longitude	108.91271353	+/- 0.01m
Hgt. (MSL)	402.885m	+/- 0.01m
Solution type	Narrow Integer	
Iono correction	Unknown	
Advanced RTK status	Verified	
Solution age	0 second	
Differential age	1 second	
# of satellites	12	
Used in solution	GPS  L1 L2 L5 GLO  L1 L2	

图4.13 position window 2

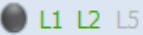
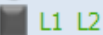
Latitude	34.23277914	+/-	0.01m
Longitude	108.91272687	+/-	0.01m
Hgt. (MSL)	402.876m	+/-	0.01m
Solution type	Narrow Integer		
Iono correction	Unknown		
Advanced RTK status	Verified		
Solution age	0 second		
Differential age	1 second		
# of satellites	12		
Used in solution	GPS  L1 L2 L5 GLO  L1 L2		

图4.14 position window 3

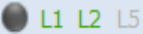
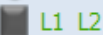
Latitude	34.23276807	+/-	0.01m
Longitude	108.91275171	+/-	0.01m
Hgt. (MSL)	402.883m	+/-	0.01m
Solution type	Narrow Integer		
Iono correction	Unknown		
Advanced RTK status	Verified		
Solution age	0 second		
Differential age	1 second		
# of satellites	13		
Used in solution	GPS  L1 L2 L5 GLO  L1 L2		

图4.15 position window 4

从图4.13~图4.15可以看到：这三个位置处都有十多颗星参与解算，因而系统可以提供比较好的观测环境。移动站定位状态都是NARROW INT，即主板此时是在差分状态下，差分龄期为1s，可以提供高精度定位数据。

在这三个位置处观察移动站的纬度、经度以及高程的误差为±0.01m。在很长的观察时间内，误差都在厘米级，表明此时测试平台可以达到厘米级范围，满足设计需求。

(2) 位置- plan window、plan view all window

图4.16~图4.21是显示了移动站从位置1到位置2、位置3和位置4的移动情况。移动站从位置1到位置2再到位置3、位置4处实际移动的平面变化量是可以通过直接测量得到的，各点之间的平面距离可以通过皮尺测量得到，测试得到位置1和位置2，位置2和位置3，位置3和位置4，位置4和位置1之间的平面距离都是2.60m。

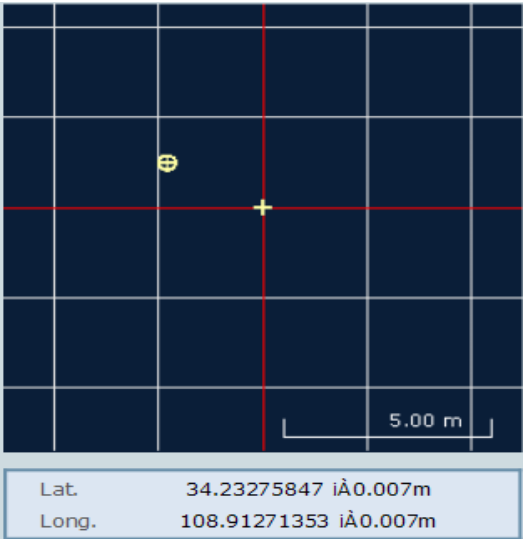


图4.16 plan window 2

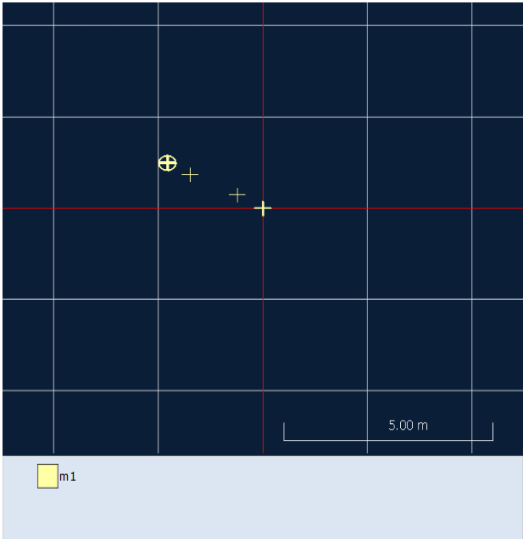


图4.19 plan view all window 2

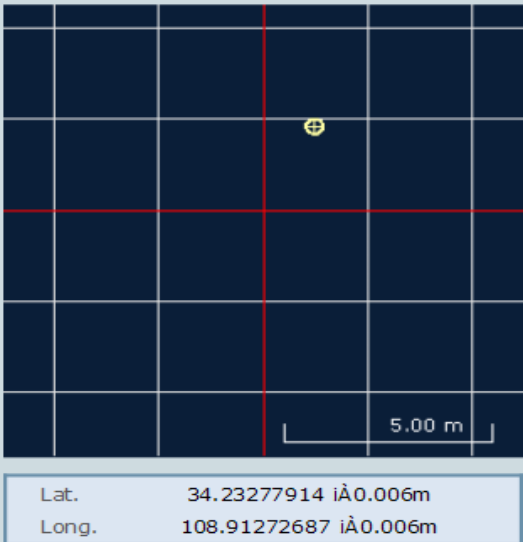


图4.17 plan window 3

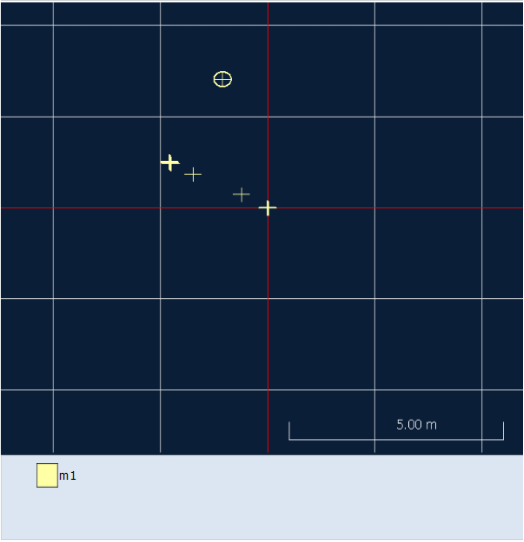


图4.20 plan view all window 3

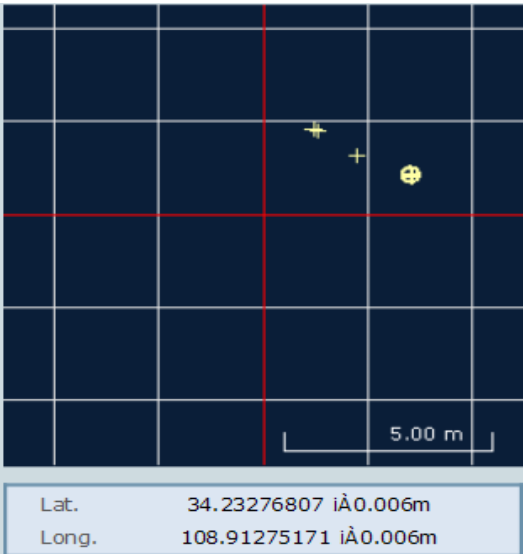


图4.18 plan window 4

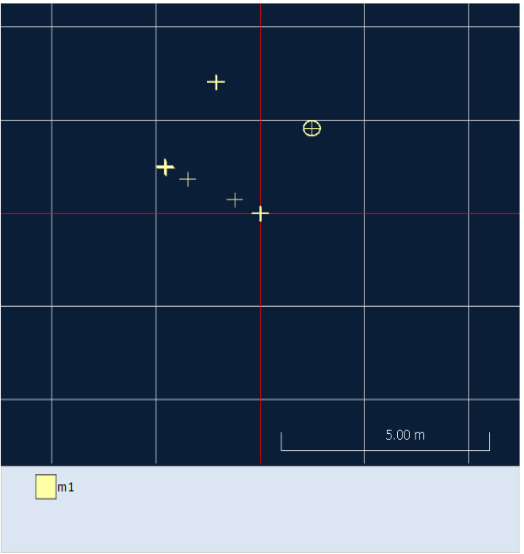


图4.21 plan view all window 4



图4.16~图4.18的plan window和图4.19~图4.21的plan view all window分别显示了移动站移动前后的位置情况，从图中可以非常直观地看到此时移动站的位置，经过比例换算得到移动站位置1和位置2、位置2和位置3的平面距离大约为2.57m，位置3和位置4的平面距离大约为2.58m。

显然，在移动范围内，移动站移动的平面距离和实际距离大致相符，两者相差在厘米范围内，因此，可以通过比较直接测量得到的移动站位置变化和图中显示的移动站位置变化来得到系统测试的大致误差，据此判断此测试平台的测试精度。由此可见，在此次设计的测试平台下，测试精度可以达到厘米级。

(3) 精度因子-Dilution Of Precision window

借助于DOP因子定义，定位结果误差可用距离测量误差和DOP因子直接相乘来得到，从图4.22~图4.24可以看到位置4相比较于位置2和3，其DOP值稍微小一些，所以得到的定位结果误差相对较小；位置2的DOP因子最大，其定位结果误差相对大一些，这和位置窗口显示的信息相符合。

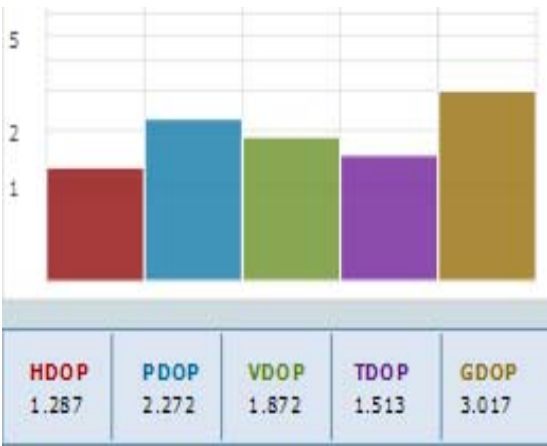


图4.22 Dilution Of Precision window 2

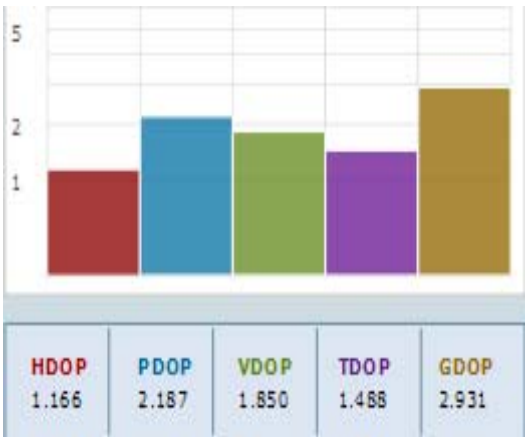


图4.23 Dilution Of Precision window 3



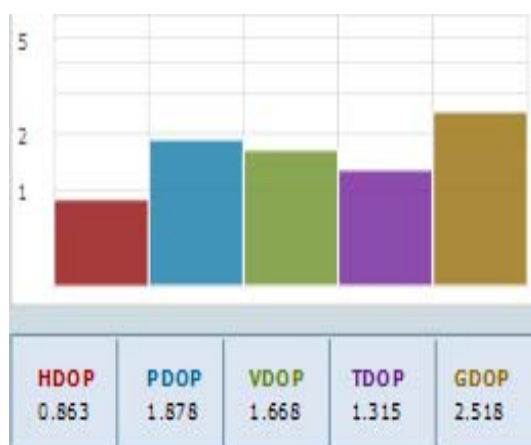


图4.24 Dilution Of Precision window 4

#### (4) 跟踪状态-tracking status window

当移动站位于位置2、位置3和位置4时，经过测试观察发现，系统在GPS和GLONASS两种跟踪状态下的载波/噪声比基本上也都在35以上，测试效果比较好。

### 二、使用软件 ComTerm

打开ComTerm测试软件，选择此时的连接串口COM7，波特率选择38400，然后点击connect。在Send Msg窗口中输入命令：

log bestposa ontime 1 // 每秒接收一次最佳位置信息

得到测试结果如图4.25所示。

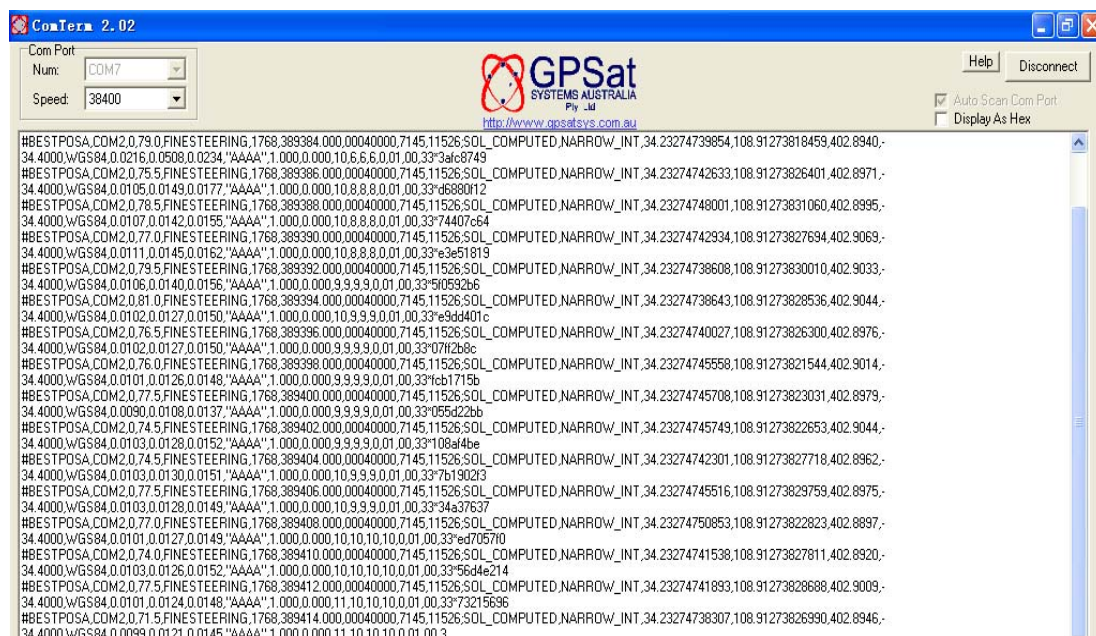


图4.25 软件ComTerm测试结果

#### 1. 将移动站安放在位置1。

在 Send Msg 窗口中输入命令：

```
log gpgga ontime 1
log gpggalong ontime 1
log bestposa ontime 1
```

读取此时的一段测试结果，得到如下结果：

```
$GPGGA,105334.00,3413.9661,N,10854.7651,E,4,13,0.9,402.90,M,-34.40,M,01,AA
AA*42
$GPGGA,105334.00,3413.9660842,N,10854.7650989,E,4,13,0.9,402.898,M,-34.40,
M,01,AAAA*74
#BESTPOSA,COM1,0,73.0,FINESTEERING,1768,384830.000,00000000,7145,1152
6;SOL_COMPUTED,NARROW_INT,34.23276807039,108.91275164759,402.8980,-3
4.4000,WGS84,0.0063,0.0056,0.0120,"AAAA",1.000,0.000,13,13,13,12,0,01,00,33*1e
945db0
```

一、分析此时测试得到的数据，从结果数据的第一个字节以及所得数据的精度就可以大致判断是输入何种命令得到的结果。表4.3和表4.4给出了以上第一段数据的各个字段的含义。

表4.3 GPGGA、GPGGALONG结果各字段含义

字段		含义
GPGGA	GPGGALONG	定位数据和波动
105334.00	105334.00	UTC定位时间
3413.9661,N	3413.9660842,N	纬度值，北纬，单位：度.分
10854.7651,E	10854.7650989,E	经度值，东经，单位：度.分
4	4	定位类型
13	13	参与解算的卫星数
0.9	0.9	水平精度因子
402.90	399.52	高程，单位：m
M	M	天线高度单元
-34.40	-34.40	波动-大地水准面和WGS84椭圆体关系
M	M	波动单元
01	01	GPS微分时间
AAAA	AAAA	微分基站ID
*42	*74	校验和

表4.4 BESTPOSA结果各字段含义

字段	含义
1768	从1970年至今的的周数是1768周
384830.000	本周的秒数， $384830.000/3600/24 \approx 4.5$ ，则当天周四
NARROW_INT	FIXEDPOS                  固定位置 SINGLE                    单点定位 NARROW_FLOAT            浮点窄巷模糊计算 WIDE_INT                  整型宽巷计算 NARROW_INT               整型窄巷计算 SUPER WIDE-LANE        超宽巷计算
34.23276807039	纬度值，单位：度
108.91275164759	经度值，单位：度
402.8980	高程，单位：m
WGS84	表示此时的坐标系统
0.0063	纬度的标准差，单位：m
0.0056	经度的标准差，单位：m
0.0120	高程的标准差，单位：m
"AAAA"	基准站ID
1.000	差分龄期
13,13,13,12	第一个13表示此时测到13颗卫星；第二个13表示参与解算的卫星数；第三个13表示有13颗卫星在L1下参与PVT解算，第四个12表示有12颗卫星在L1、L2下参与PVT解算。
*1e945db0	CRC

(1) 分析表4.3和表4.4给出的各个字段以及其表示的含义，可以得到此时的测试平台的一些状态和性能等。

从表4.3可以看到，结果数据中给出了参与解算的卫星数目，此卫星数目和NovAtel Connect软件测试下的星座图看到的卫星数相符，由此卫星数可以判断系统测试环境的好坏。

同时，结果数据中的定位类型字段给出了测试平台所处的状态，此字段0表示没有固定或无效；1表示定点；2表示C/A差分GPS；4表示RTK固定；5表示RTK不固定。此时系统的定位类型字段的是4，表明测试系统处于RTK状态，并且此时的差分龄期是1s，由此判断正常情况下系统可以输出较高精度的位置信息。在测试过

程中，可以简单地通过此字段来判断系统的是否进入差分状态。

从表4.4所给出的输出结果上看，BESTPOSA结果字段中的NARROW\_INT表示测试时定位类型，表4.4列出了此字段的各种状态，可以通过观察这个字段的数据来简单的判断系统的状态。，例如此时的NARROW\_INT就是表示此时的位置1测试是处在差分状态下，正常情况下可以得到比较好的测试效果。同时，输出结果也给出了测试时的卫星情况，由此判断系统测试环境良好。

(2) 由表4.3和表4.4，比较三种命令的输出结果，可以看到：

GPGGA数据描述了时间、位置以及修正相关数据；GPGGALONG的结果字段和GPGGA几乎一样，但是GPGGALONG的精度更高，使用更多。

BESTPOSA描述的是最佳位置数据，其结果语句包含了几种状态指标，包括差分改正量，在RTK模式下运行的系统，该日志反映了最新的低延迟解决方案，得到最佳的位置信息，BESTPOSA的数据精度要高于GPGGA的数据精度，实际应用中根据需求选择命令来输出结果数据。

(3) 比较三种命令输出结果的数据量，显然GPGGA的数据量更小。因为GPGGA支持的是ASCII格式，BESTPOSA支持的是二进制格式数据，在实际应用根据具体的需求设置结果输出格式。

(4) GPGGA和GPGGALONG结果数据中给出了测试得到的移动站位置数据，包括纬度、经度、高程，根据波动-大地水准面和WGS84椭圆柱关系，结合测得的纬度、经度以及高程的具体数值可以进行坐标转换，从而更加直观地看出此时移动站位置的具体情况。

同样，BESTPOSA结果数据中也给出了测试得到的移动站位置数据，包括纬度、经度和高程，可以通过坐标转换成平面坐标，和实际测试得到的移动站的位置作比较，得到系统的测试误差。同时，BESTPOSA结果数据中改给出了纬度、经度和高程的测量标准差，可以在测试过程中直接观察，大致的判断测试系统的精度。

二、将测试结果数据中的纬度、经度以及高程转换成平面坐标，观察测试结果精度，并且和实际测量值作比较。

测试结果中的纬度、经度以及高程是在WGS84坐标系下得到的，要和实际平面距离相比较，需要先经过坐标转换。通过坐标转换工具将WGS84坐标系下的空间坐标转换成WGS84坐标系下的空间坐标下的平面坐标，投影设置采用UTM投影，投影参数设置中央子午线114:00:00，x常数=0，y常数=500000，投影面高程=0。

分别将位置1处测试得到的GPGGA、GPGGALONG以及BESTPOSA结果数据中的纬度、经度和高程转换成平面坐标，如图4.26~图4.28所示。

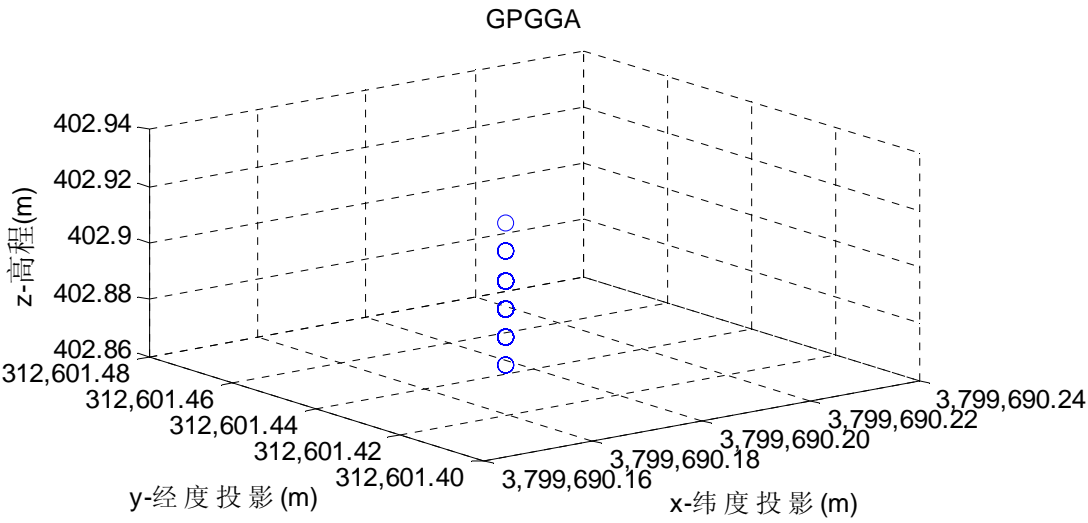


图4.26 不加终端，位置1处GPGBGA坐标转换后的位置示意图

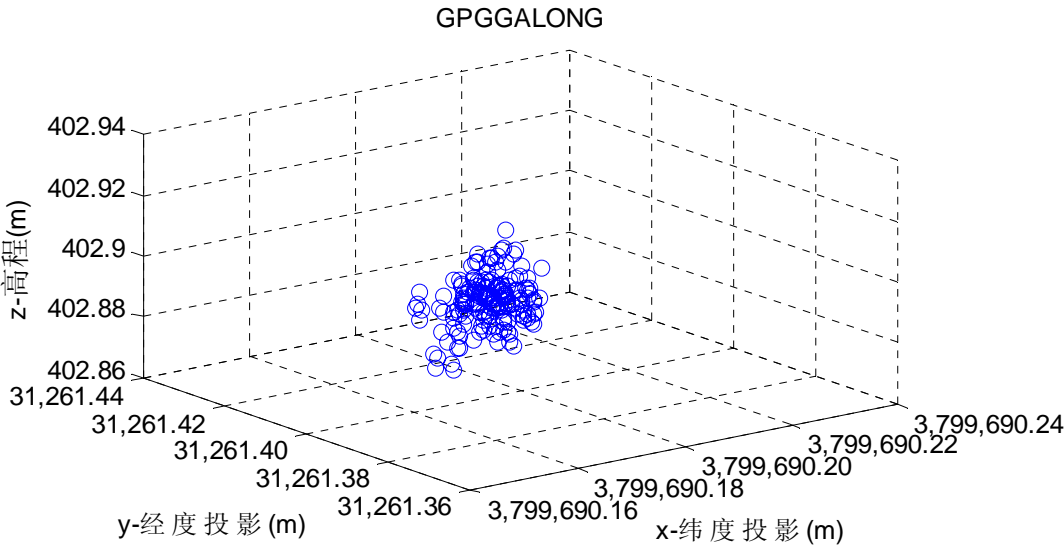


图4.27 不加终端，位置1处GPGBALONG坐标转换后的位置示意图

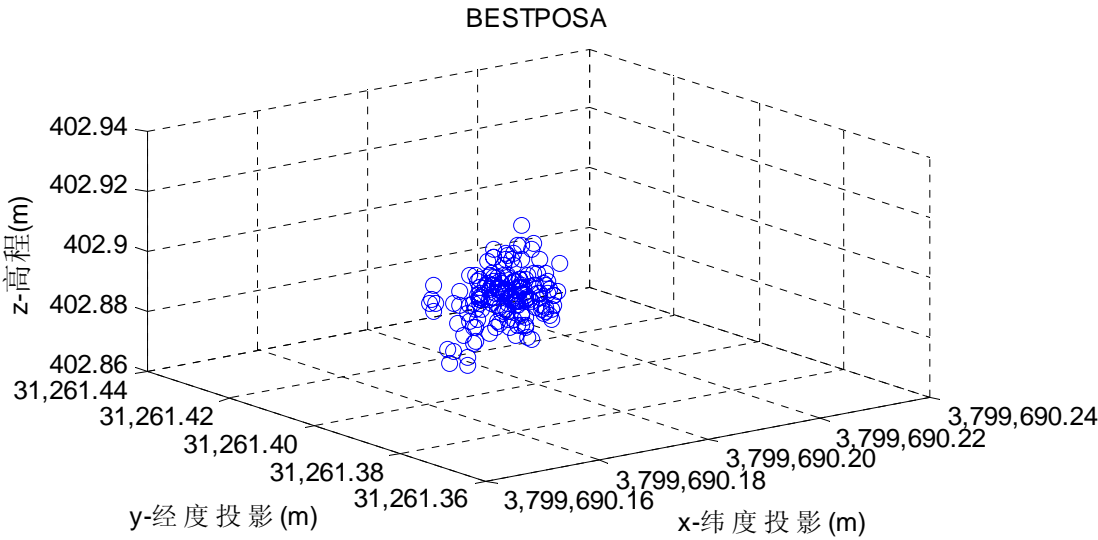


图4.28 不加终端，位置1处BESTPOSA坐标转换后的位置示意图

从图4.26~图4.28中可以非常清楚地看到:

(1) GPGGA相较于GPGGALONG和BESTPOSA转换后的结果示意图中的点比较稀疏,这是由于三者相比较而言,GPGGA的测试精度远小于GPGGALONG和BESTPOSA。GPGGALONG和BESTPOSA转换后的结果比较相似,如果需要精度稍微高些,这两种都是很好的选择。

(2) 此时的测试平台下测得的位置1变化范围很小,纬度、精度和高程都在厘米范围内变化。由此可见此测试系统的测试精度可以达到厘米级。

2. 将移动站移动到位置2、位置3、位置4处。

不改变其他设置,将移动站依次移动到位置2、位置3、位置4处。位置1,位置2,位置3和位置4同样位于正方形的四个顶点上,移动站从位置1到位置2再到位置3、位置4处实际移动的平面距离可以通过皮尺直接测量得到,测试得到四点位于边长为2.60m的正方形的顶点。

在三个位置分别测试一段时间,得到的移动站在这三处的位置数据,将测试结果数据中的纬度、经度以及高程转换成平面坐标,得到图4.29~图4.31。从图中可以看到:

(1) 从三维图中大致可以看到移动站几个位置的大致坐标,与实际的移动情况相似。

(2) 从图4.29~图4.31可以看到移动在四处位置的高程变化量很小,大概在1cm以内。本次设计的系统希望精度在厘米级,因此在研究系统测试结果精度的时候可以暂时忽略高程变化,假设四个位置的高程不变。

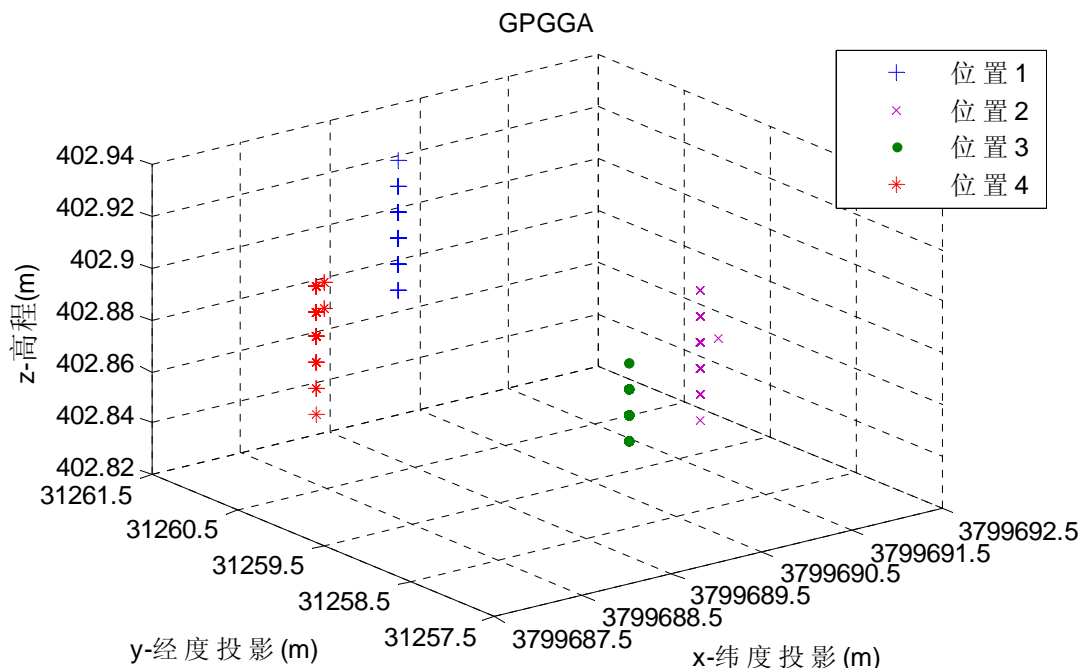


图4.29 不加终端,不同位置移动站GPGGA坐标转换后的位置示意图

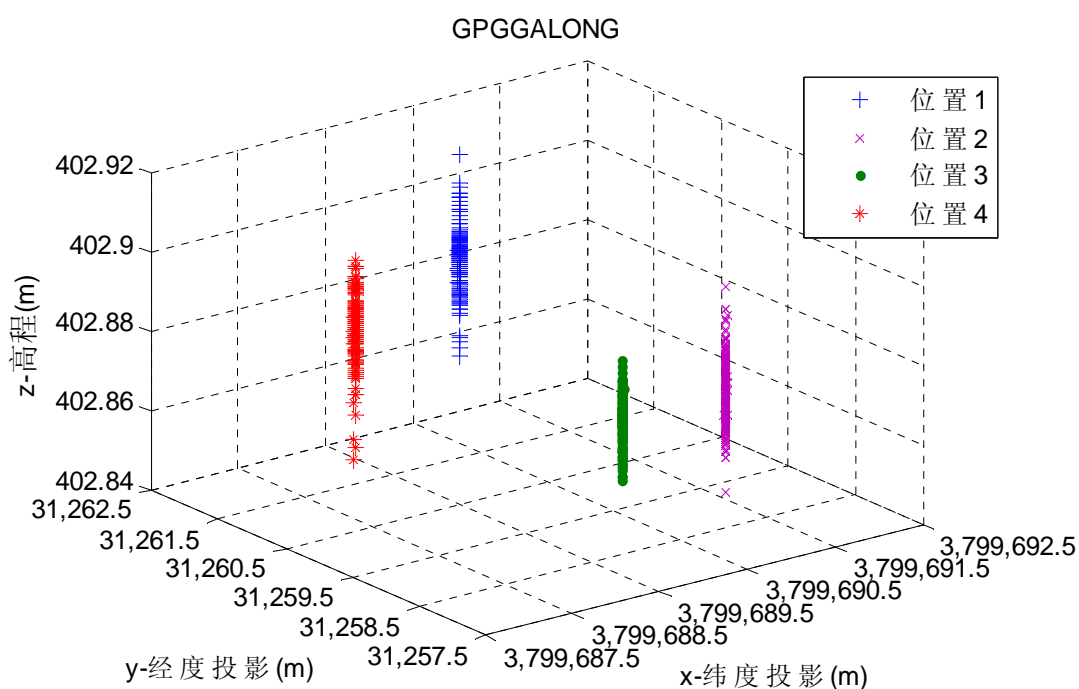


图4.30 不加终端，不同位置移动站GPGGALONG坐标转换后的位置示意图

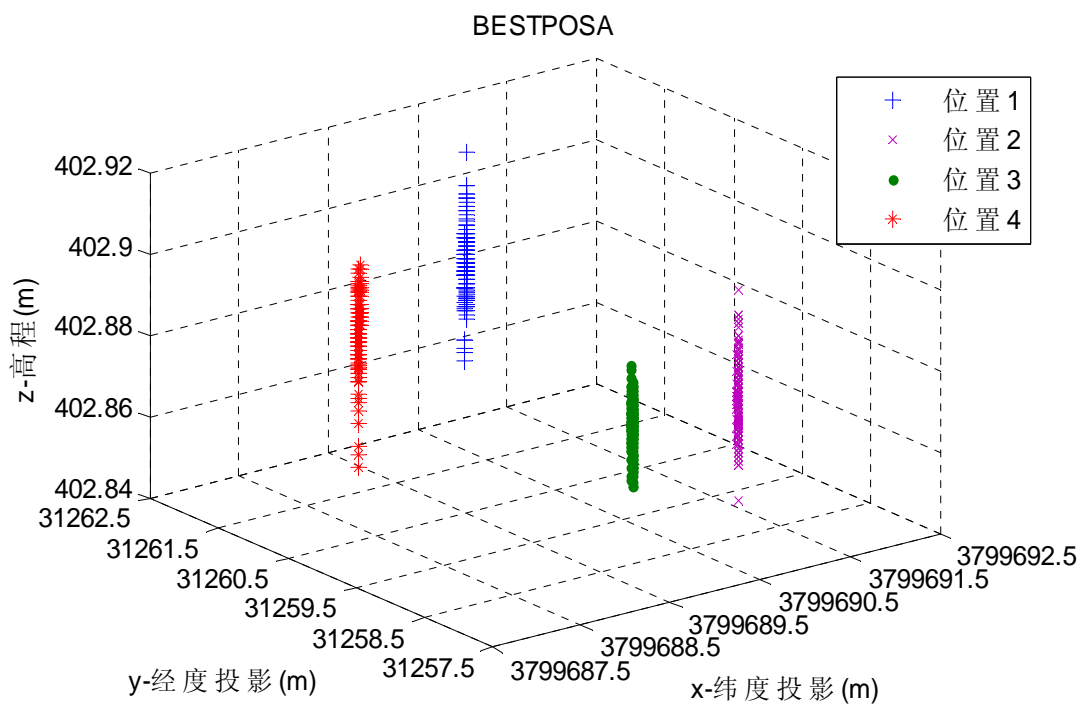


图4.31 不加终端，不同位置移动站BESTPOSA坐标转换后的位置示意图

根据前面的分析，高程的变化在1cm以内，它对系统的测试精度影响很小，可以忽略高程变化的影响，得到如图4.32~图4.34所示的不同位置移动站坐标转换后的(x,y)平面示意图。图中标出了每个位置测试结果的x和y的均值，由此来大致表示测试得到的各个位置的准确坐标。

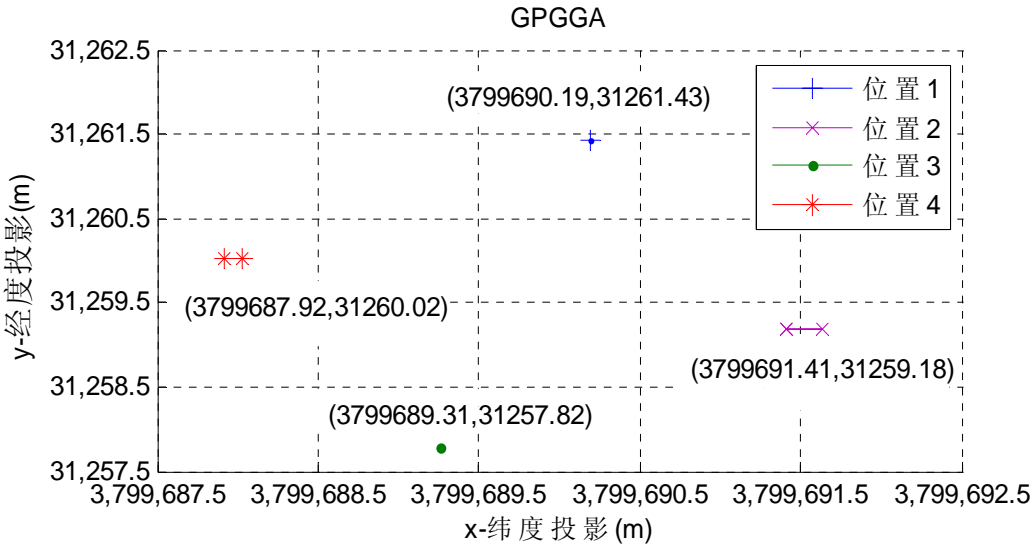


图4.32 不加终端，不同位置移动站GPGGA坐标转换后的(x,y)位置示意图

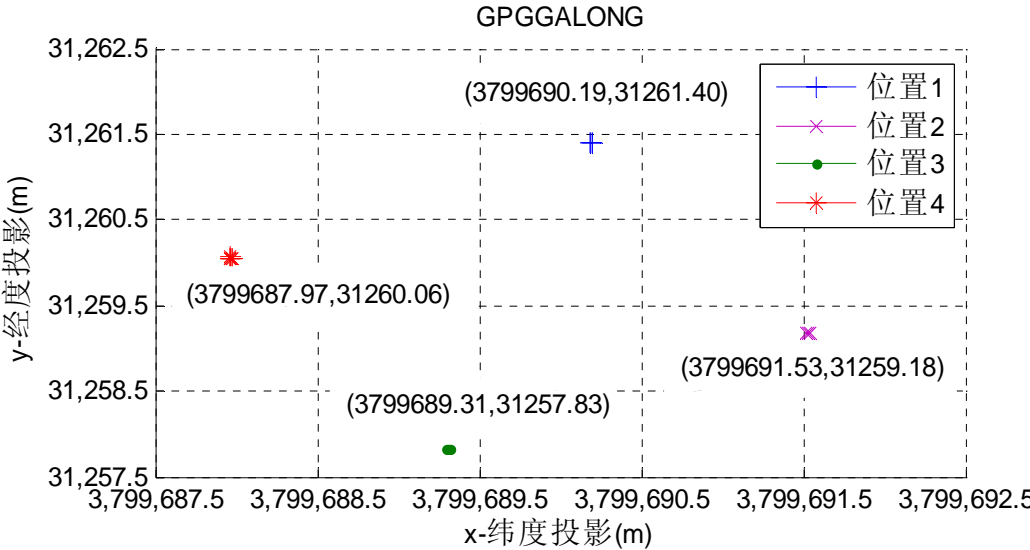


图4.33 不加终端，不同位置移动站GPGGALONG坐标转换后的(x,y)位置示意图

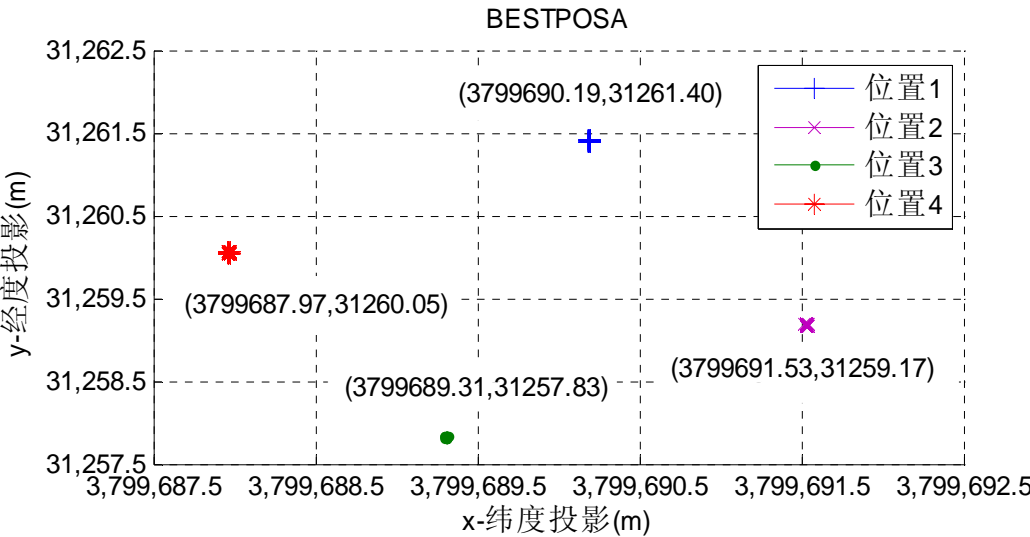


图4.34 不加终端，不同位置移动站BESTPOSA坐标转换后的(x,y)位置示意图



计算图4.32~图4.34中的各个位置之间的距离，得到表4.5。

表4.5 不加终端，各位置间的平面距离

类型	位置1、2	位置2、3	位置3、4	位置4、1
GPGGA/m	2.559	2.502	2.602	2.672
GPGGALONG/m	2.593	2.598	2.601	2.590
BESTPOSA/m	2.602	2.593	2.593	2.598

从表4.5中得到的计算数据可以看到：

(1) 三种类型的结果数据GPGGALONG和BESTPOSA的结果大致相似，而GPGGA测得的结果相差比较大，这主要是由于GPGGA的测试得到的数据精度比较低，转换成平面坐标以后的差距就会更大，因此为了得到更高精度的数据结果，一般选择GPGGALONG或者BESTPOSA。

(2) 计算得到的结果数据中相邻位置之间的距离大致都在2.60m左右，相差在厘米范围内，由此可知此时的系统测试平台可以满足设计的厘米级的需求。

(3) 从图4.32中可以看到位置2和位置4处都有一个点明显偏离大致的中心位置，这是在测试过程中故意让其偏离，由此观察系统是否能够识别偏离位置，由此系统可以实现监测。当系统应用在输电线路路上，一旦在测试的过程中移动站的位置偏离了规定的范围就可以迅速的发现，从而做出及时的反应。

#### 4.3.2 加入终端的测试平台

系统最初的设计模式下，正常的工作系统包括基站、移动站和终端三个部分，设计在终端监测，即本次测试加入终端的测试平台。

##### 1. 将移动站放置于不同位置处。

不加入终端的测试平台类似，加入终端的测试平台移动站依次放置于在位置1、位置2、位置3以及位置4处，测试四处的移动站位置。因为加入终端的平台下，终端和移动站不能进行命令交互，终端电台只能接收数据，因此终端得到的输出结果取决于移动站的配置。拟设置在加入终端的测试平台下系统配置时移动站电台的发送采用GPGGALONG和BESTPOSA两种。

不改变其他设置，将移动站依次放置于在位置1、位置2、位置3以及位置4处，四点位于正方形的四个顶点上，通过皮尺测量得到这四点位于边长为2.60m的正方形的顶点。在四个位置分别测试一段时间，得到的移动站在这四处的位置数据。

测试得到的移动站位置的纬度、经度以及高程是在WGS84坐标系下，要和实际测试得到的平面距离相比较，同样需要先经过坐标转换。通过坐标转换工具将

WGS84坐标系下的空间坐标转换成WGS84坐标系下的空间坐标下的平面坐标，投影设置采用UTM投影，投影参数设置中央子午线114:00:00，x常数=0，y常数=500000，投影面高程=0。转换以后得到的GPGGALONG和BESTPOSA结果如图4.35和图4.36所示。

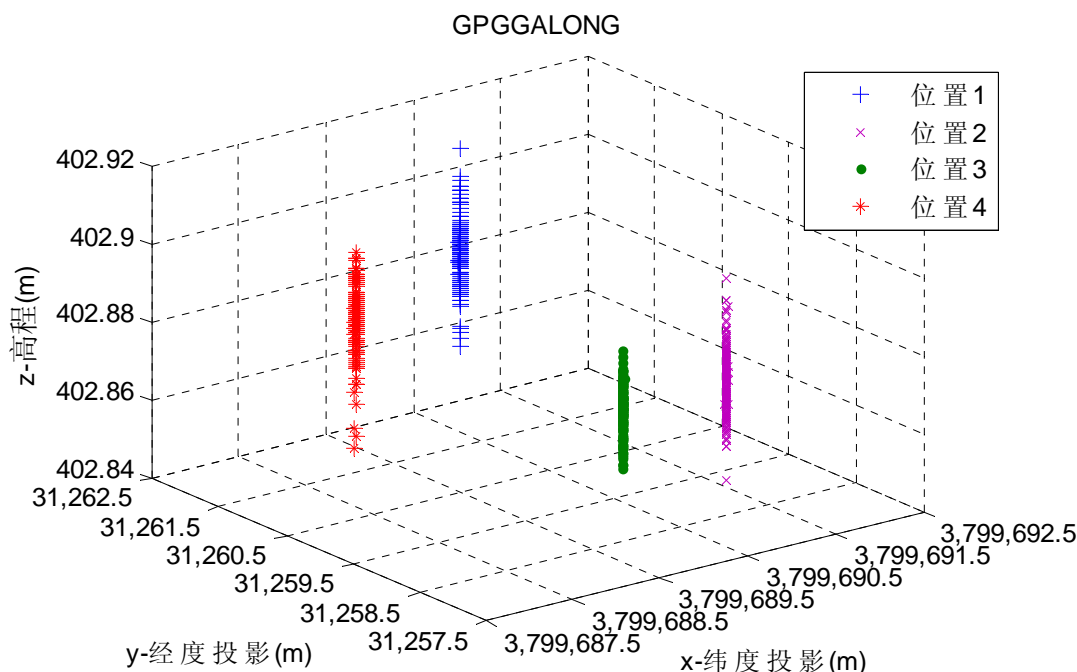


图4.35 加入终端，不同位置移动站GPGGALONG坐标转换后的位置示意图

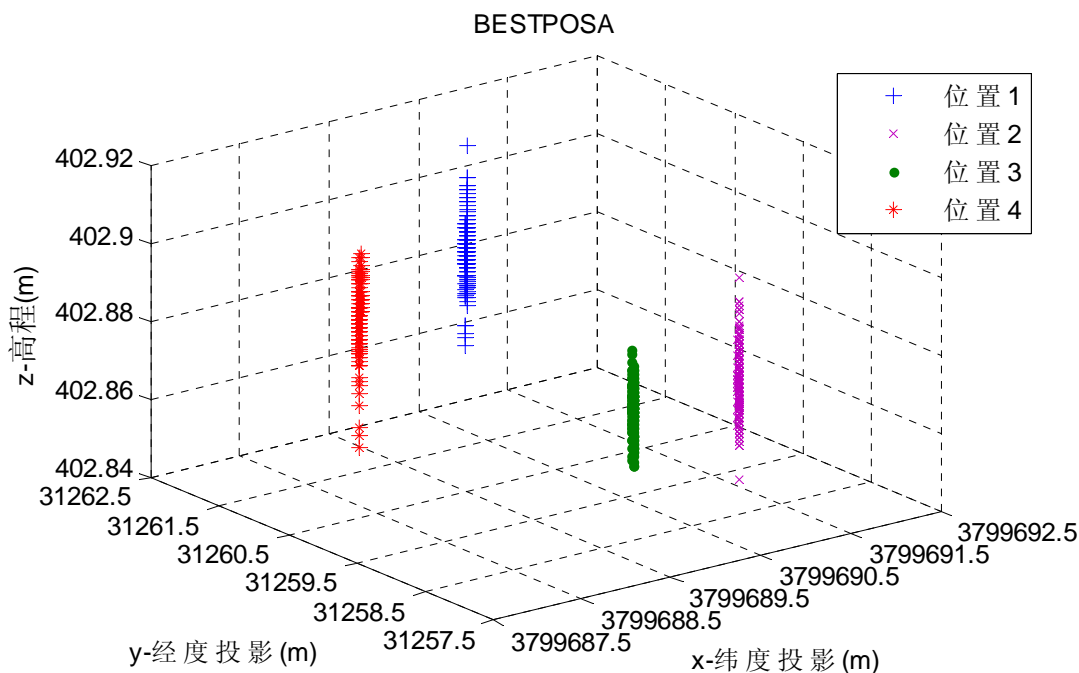


图4.36 加入终端，不同位置移动站BESTPOSA坐标转换后的位置示意图

从图4.35和图4.36可以看到：

(1) GPGGALONG和BESTPOSA转换后的结果比较相似，在两个三维图中大致

可以看到移动站几个位置的大致坐标，与实际的移动情况大致相似。

(2) 从图4.35和图4.36中可以看到此时的测试平台下测得的几个位置的纬度、经度和高程变化范围很小，纬度、精度和高程都在厘米范围内变化。同时可以看到高程的变化范围在1cm以内，它对期望系统的厘米级精度影响很小，因此可以通过直接观察(x,y)平面示意图，如图4.37和图4.38所示。

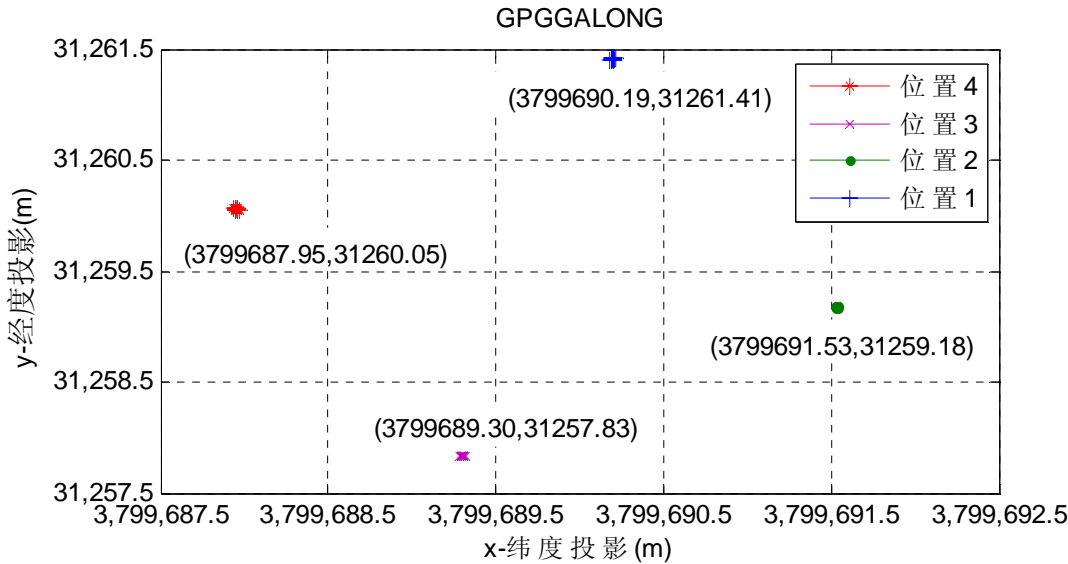


图4.37 加入终端，不同位置移动站GPGGALONG坐标转换后的(x,y)位置示意图

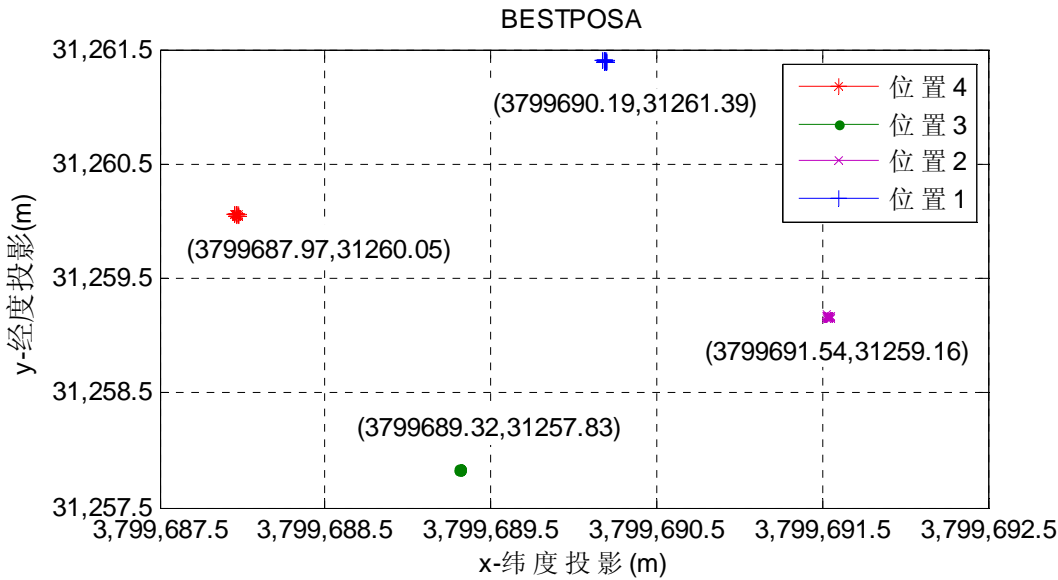


图4.38 加入终端，不同位置移动站BESTPOSA坐标转换后的(x,y)位置示意图

计算图4.37和图4.38中的各个位置之间的距离，得到表4.6。

表4.6 加入终端，各位置间的平面距离

类型	位置1、 2	位置2、 3	位置3、 4	位置4、 1
GPGGALONG/m	2.607	2.588	2.598	2.593
BESTPOSA/m	2.602	2.607	2.598	2.621

从表4.6中得到的计算数据可以看到：

- (1) GPGGALONG和BESTPOSA两种类型的结果数据大致相似。虽然两者的数据量不一样，尤其是电台是通过时延来切换，两者数据通过电台传输所受的影响不一样，BESTPOSA受的影响更大。但是BESTPOSA的精度高于GPGGALONG，弥补了上面的损失。因此，两者数据结果大致相似，任意一种都可以得到比较好的测试结果。
- (2) 分析表中的数据，即使是加入高程的变化量，计算得到的结果数据中相邻位置之间的距离也都在 2.60m 左右，相差在厘米范围内。由此可知此时加入终端的系统测试平台可以满足设计的厘米级精度需求。

2. 比较不加终端和加入终端两种测试平台下的测试结果。

图 4.39 和图 4.40 给出了两种测试平台下不同位置移动站坐标转换后的位置示意图。从图中可以看到两种情况下的测试结果几乎重合，从而说明系统中是使用的电台对测试精度影响很小，不加电台直接在移动站观测结果来初步的研究系统是否可以达到设计要求的做法是可行的。比较表 4.5 和表 4.6 的计算数据，两种测试平台下的数据非常相近，从而也证明了这种做法可行。

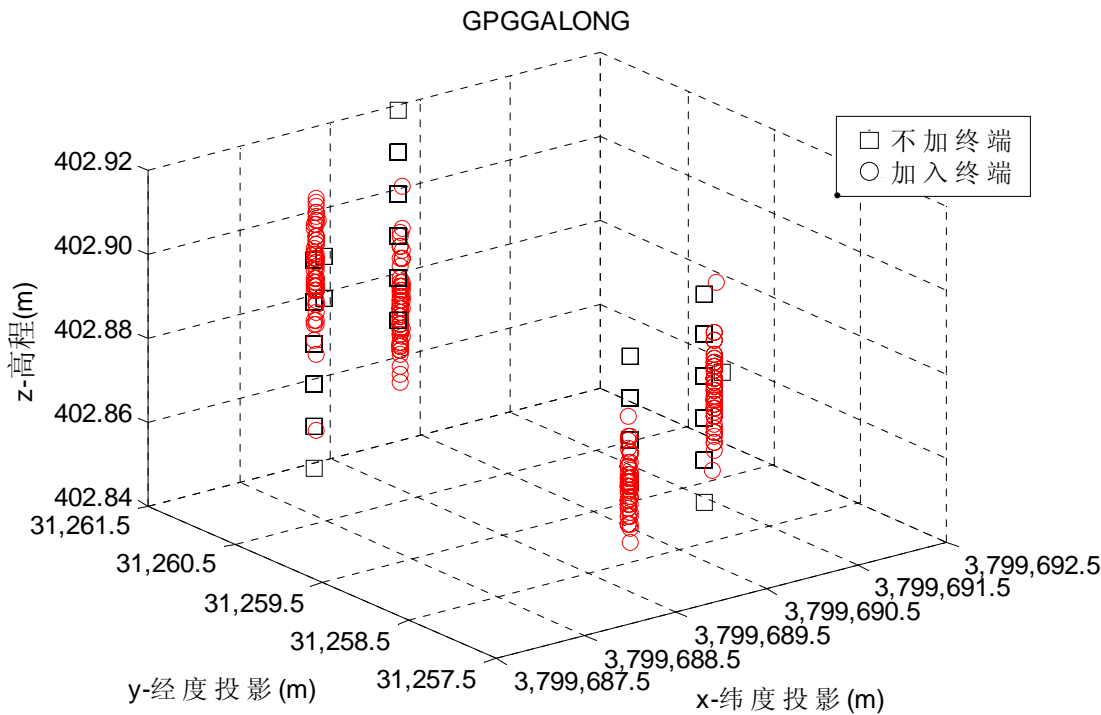


图4.39 两种测试平台下，不同位置移动站GPGGALONG坐标转换后的位置示意图

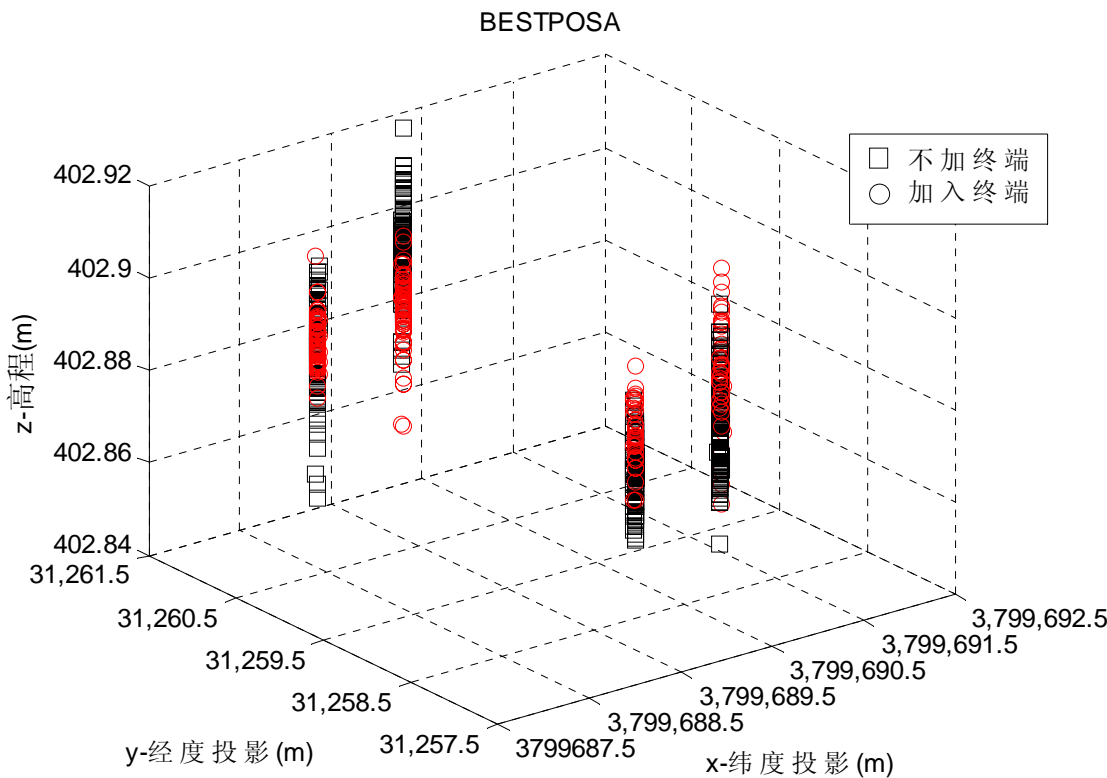


图4.40 两种测试平台下，不同位置移动站BESTPOSA坐标转换后的位置示意图

同样，由于高程变化量非常小，暂时忽略其变化，比较加入电台和不加电台两种测试平台下位于不同位置的移动站测试得到的结果经过坐标转换后得到的(x,y)位置示意图，如图 4.41 和图 4.42 所示。可以看到，两种测试平台下的测试结果几乎重合，进一步验证了不加电台直接在移动站观测结果来初步的研究系统是否可以达到设计要求的做法是可行的。

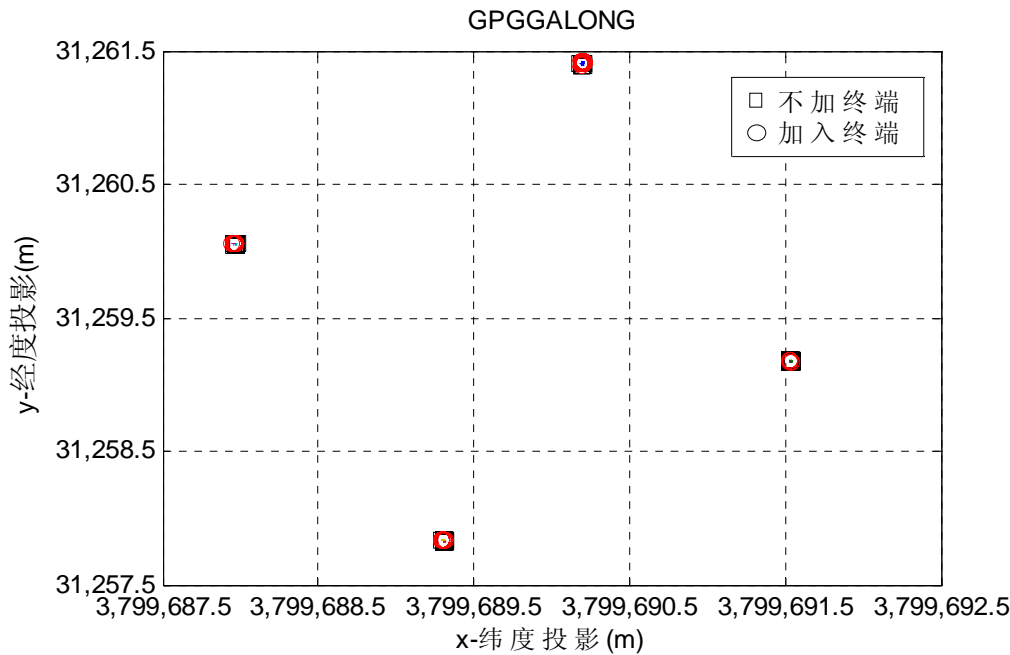


图4.41 两种测试平台下，不同位置移动站GPGGALONG坐标转换后的(x,y)位置示意图

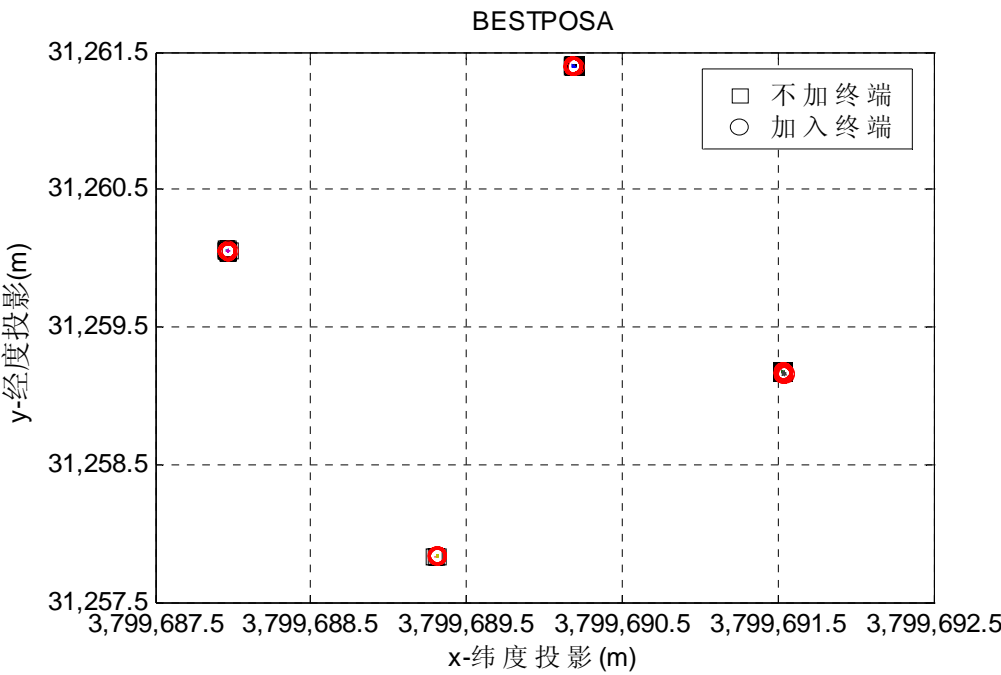


图4.42 两种测试平台下，不同位置移动站BESTPOSA坐标转换后的(x,y)位置示意图

4.4 本章小结

本章首先介绍了本次测试所构建的系统测试平台，然后介绍了系统测试前电台和主板的初始化操作。在此基础上分别给出了不加终端和加入终端两种测试平台下的测试结果。测试结果表明，此次设计的系统定位精度达到厘米级范围，满足实际应用的需求。

## 结束语

差分 GPS 定位，尤其是高精度差分 GPS 定位的应用需求已经越来越广泛，它可以实现实时数据传输，同时满足高精度的监测需求，如输电线路的在线监测等。本文在对定位系统的理论研究和理解的基础上，设计并实现了基于差分 GPS 的高精度在线定位系统。测试结果表明，该系统可以达到厘米级的精度，满足实际应用的要求。本次的主要工作包括以下几个方面：

- 1、根据实际应用环境和厘米级精度的监测要求，选择采用差分定位方法，完成了系统的详细设计方案，分析了系统设计方案实现的可能性；结合可靠性、经济性和实用性的要求选择了系统的器件；根据所选器件，完成了系统各部分的通信连接设计。

- 2、根据所选器件和通信连接的设计，完成了外围电路的设计，为主要器件提供外部支持，包括供电、电平转化等等；完成了设计的外围电路即底板的制作、焊接以及调试等等，确保底板可以提供对主板的外部支持。

- 3、在完成了对系统方案研究设计以及底板制作完成的基础上，构建了本次设计的系统测试平台。选择了不加入终端直接在移动站观测以及加入终端在终端观测的两种测试平台，同时在这两种平台下分别在不同点进行测试和验证。测试结果表明此次设计的系统定位精度达到厘米级范围，可以满足输电线路在线监测的精度需求。

由于时间有限，本次论文还可以从多方面继续进行深入的研究：

- 1、本次设计利用时延来实现电台数据收发的切换，此过程中数据会出现丢包等现象。在文中第三章系统设计方案中提到使用单片机来控制电台的收发切换，在后续的研究中可以考虑加入单片机控制模块控制电台的接收发送，从而提高系统的可靠性。

- 2、系统设计中移动站选择了半双工的电台，在终端观察可以得到移动站的准确信息，但是不可以实现和电台的交互，在条件允许时可以选择采用多接口、大带宽的全双工电台。

- 3、本文设计的系统主板采用的还是 GPS 和 GLONASS，随着北斗卫星的使用更加成熟，可以考虑采用北斗卫星替代 GPS 和 GLONASS。





## 致谢

岁月如梭，转眼间我的研究生生活即将结束。回想这两年多时间生活的点点滴滴，尤其是在学术上，离不开周围人无私的指点和帮助，让我能够更进一步。借此机会，谨向每一位曾经关心、帮助和支持我的人表示衷心的感谢。

首先，非常感谢我的导师刘祖军老师。从开始接触刘老师，他就给了我很多的鼓励和支持。经过这么长时间的接触，每一次和刘老师交谈，尤其是在学术上，我可以强烈的感觉到刘老师是一个治学非常严谨的人，他对于我学习和科研的要求毫不含糊，希望我能在研究生期间真正学到东西，做出一定的成果。在我遇到困难的时候又给了我很多指导和帮助，让我豁然开朗。在生活上，刘老师也是一个非常随和的人，让大家觉得他不仅仅是老师，更是我们的朋友。即使老师现在在国外，他依然时刻关注着学校里我们的学习和生活情况，关心我的科研进展情况，给我一些指导和建议。非常感谢刘老师对我的关心和支持，我一定会更加努力，更上一层楼。

同时，非常感谢孙德春老师。孙老师可以说是我的第二个导师，也是我的良师益友。从我开始负责项目之初，孙老师就一直在不断的帮助和指导我。不管是平时遇到问题，或是汇报工作进展，孙老师总能给我提出一些问题，给出很多建设性的意见，指导我更好地完成项目。后来刘老师出国以后，孙老师就完全负责我们的学习和生活，更是给了我很多的帮助和支持。非常感谢孙老师，我会继续努力的。

感谢实验室的其他所有老师，虽然和他们的接触不多，但是每一次集体活动中老师们都热情的参与，让我感受到了我们通信信号处理课题组的温暖和关怀。

感谢茹一帆、王洋，还有师弟张文欣和吴立新，他们都在我的项目上给予很多的帮助，让我的项目能够更加顺利的完成；感谢林美华、王一，有你们的陪伴，让我觉得咱们老师的团队更有活力；感谢实验室的师兄师姐、同学以及学弟学妹们，有你们的存在，不仅使实验室的学术氛围浓厚，而且使我的研究生生活更加丰富多彩。虽然大家都即将分别，我们的友情一定会地久天长。

感谢我的爸妈和妹妹，是他们每天辛苦的工作为我提供良好的学习机会。在每当我遇到困难时，不断地给我鼓励和支持，做我坚强的后盾，使我不断的前进。

再次感谢感谢所有培养和教育过我的老师们，以及所有关心、帮助和感动过我的朋友们，同时感谢悉心审阅本论文的各位老师。



## 参考文献

- [1] 刘祺. 高压输电线路的在线监测[J]. 科技创业月刊, 2011, 24(1): 189-190.
- [2] Mahajan S M, Singareddy U M. A Real-Time Conductor Sag Measurement System Using a Differential GPS[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2012, 27(2): 475-480.
- [3] 赵增华, 石高涛, 韩双立, 等. 基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 80-84.
- [4] 黄新波, 陶保震, 赵隆, 等. 采用无线信号传输的输电线路导线风偏在线监测系统[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2350-2356.
- [5] 刘利生, 吴斌, 曹坤梅. 卫星导航测量差分自校准融合技术[M]. 国防工业出版社, 2007.
- [6] 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.
- [7] 籍利平. 基于北斗导航卫星的伪卫星技术在区域定位中的应用[J]. 测绘科学, 2002, 27(4): 53-56.
- [8] 徐爱功, 韩晓东, 崔希民, 等. 全球卫星导航定位系统原理与应用[M]. 中国矿业大学出版社, 2009.
- [9] Huang J, Tan H S. A low-order DGPS-based vehicle positioning system under urban environment[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2006, 11(5): 567-575.
- [10] Zhang Y, Bartone C. Improvement of high accuracy DGPS with real-time wavesmooth multipath mitigation technique[C]. Aerospace Conference, 2005 IEEE. IEEE, 2005: 1825-1836.
- [11] Blomenhofer H, Hein G W, Taveira Blomenhofer E, et al. Development of a real-time DGPS system in the centimeter range[C]. Position Location and Navigation Symposium, 1994, IEEE. IEEE, 1994: 532-539.
- [12] Jin M H, Han Y H, Choi H H, et al. GPS spoofing signal detection and compensation method in DGPS reference station[C]. Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011 11th International Conference on. IEEE, 2011: 1616-1619.
- [13] 黄丁发, 丁建伟, 夏捷. 差分 GPS 连续运行参考站 (网) 建设研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(4): 375-378.
- [14] 李英冰, 徐绍铨. 利用 RTK 进行数字化测图的经验总结[J]. 全球定位系统, 2005, 30(5): 30-34.

- [15] 宋珉, 张东, 胡振彪. 不同校正方法对 RTK 测图精度的影响[J]. 全球定位系统, 2011, 36(6): 80-82.
- [16] Morales Y, Tsubouchi T. DGPS, RTK-GPS and StarFire DGPS performance under tree shading environments[C]. Integration Technology, 2007. ICIT'07. IEEE International Conference on. IEEE, 2007: 519-524.
- [17] 高为广, 楼益栋, 刘杨, 等. 卫星导航系统差分增强技术发展研究[J]. 测绘科学, 2013, 1: 018.
- [18] Kaplan ED, H C J. GPS 原理与应用[M]. 电子工业出版社, 2007.
- [19] Gu X, Lipp A. DGPS positioning using carrier phase for precision navigation[C]. Position Location and Navigation Symposium, 1994, IEEE. IEEE, 1994: 410-417.
- [20] 陈灿辉, 张晓林. 一种新的卫星导航系统快速选星方法[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2887-2891.
- [21] 邓潇. 基于差分 GPS 相对定位的方法探究[J]. 价值工程, 2011, 30(20): 125-126.
- [22] 刘会杰, 张乃通. 区域卫星定位系统的星座设计[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(10): 994-999.
- [23] 周广勇, 李良良. 基于 STK 的全球卫星导航定位系统 DOP 值仿真[J]. 地理空间信息, 2009, 7(3): 102-104.
- [24] Yaqin C, Xiang M, Jingjun G, et al. Development of DGPS system based on FM subcarrier data link[C]. Microwave and Millimeter Wave Technology, 2000, 2nd International Conference on. ICMMT 2000. IEEE, 2000: 408-411.
- [25] 王广运, 李洪涛, 郭秉义, 等. 差分 GPS 定位技术与应用[M]. 电子工业出版社, 1996.
- [26] 胡志坚, 李洪江, 文习山, 等. 基于差分 GPS 的输电线路舞动和风偏在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 120-124.
- [27] Blomenhofer H, Hein G W, Taveira Blomenhofer E, et al. Development of a real-time DGPS system in the centimeter range[C]. Position Location and Navigation Symposium, 1994, IEEE. IEEE, 1994: 532-539.
- [28] 李良, 张小超, 赵化平. GPS 差分 RTCM 数据实时编码解码算法及实现[J]. 计算机工程与应用, 2006, 11: 060.
- [29] 王浩, 姚一飞. GPS 载波相位测量[J]. 科技致富向导, 2011 (3).
- [30] Mensah-Bonsu C, Krekeler U F, Heydt G T, et al. Application of the global positioning system to the measurement of overhead power transmission conductor sag[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2002, 17(1): 273-278.
- [31] 王晓湘, 柯有安. DGPS 各种误差因素分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000,

- 22(6): 15-17.
- [32]何磊明. 一种用于 GPS 时差比对数据处理的卡尔曼滤波器设计[J]. 宇航计测技术, 2010 (001): 11-14.
- [33]王峰波. 浅析 GPS 差分算法及数据处理[J]. 科技信息, 2009, 25: 023.
- [34]高洪民, 汪渤. DGPS 导航定位系统的设计实现[J]. 仪器仪表学报, 2002, 6: 24-2.
- [35]陈树新, 王永生, 陈飞. 实时动态载波相位差分 GPS 定位精度分析[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(3): 1-5.
- [36]孟凡超. GPS-RTK 与全站仪联合作业在数字测图中的应用[J]. 北京测绘, 2010, 2: 57-60.
- [37]龙勇, 向茂生, 尤红建, 等. 高精度动态 GPS 在机载新型 SAR 上的应用研究与分析[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 450-455.
- [38]雷波, 陈华德, 李青, 等. 基于动态差分 GPS 的滑坡位移监测系统[J]. 中国计量学院学报, 2011, 3: 002.
- [39]侯林山, 王金龙, 朱三妹, 等. 利用差分 GPS 进行地面沉降监测的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 811-815.