

文章编号: 1001-0920(2008)11-1305-06

## 移动闭塞系统列车组合定位导航技术研究

潘 登, 郑应平

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘 要:** 首先,分析了移动闭塞系统及其定位导航技术的研究现状,建立了基于网络实时动态测量(RTK)技术的GPS/INS/MM的定位导航组合方案;然后,提出了用伪距差分计算用户站概略位置和用载波相位差分计算整周模糊度单差值的快速差分算法,并讨论了有助于列车导航和控制的列车信息移动管理和基于GPRS的数据通信等;最后,对网络RTK快速差分算法进行了仿真分析,其结果验证了该算法对实现列车实时精确定位导航的可行性。

**关键词:** 移动闭塞系统;组合定位导航;网络RTK技术;快速差分算法;移动性管理

中图分类号: U666.11

文献标识码: A

## Integrated train positioning and navigation system under moving automatic block system

PAN Deng, ZHENG Ying-ping

(School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China. Correspondent: PAN Deng, E-mail: pandengreal@hotmail.com)

**Abstract:** After analyzing the status quo of moving automatic block system and its positioning and navigation technology, this paper constructs the integrated GPS / INS / MM positioning and navigation scheme based on network real time kinematic (RTK), and presents the fast double-differential algorithm in which the pseudo-range differential algorithm is used to calculate the approximate position of user station and the single-difference of the integer ambiguity is given by the carrier phase differential algorithm. Then, the moving management of train information and the data communication based on general packet radio service (GPRS) are discussed for train navigation and control. The preliminary simulation for the fast differential algorithm based on network RTK proves its feasibility to the precise train positioning and navigation in real time.

**Key words:** Moving automatic block system; Integrated train positioning and navigation; Network real time kinematic; Fast differential algorithm; Moving management

### 1 引 言

移动闭塞系统是一种基于精确定位技术,它能连续检测列车位置、速度等参数,并合理确定符合当前线路状况、以及先行列车和自身的牵引制动性能的列车行为,确保安全高效运行的新型自动控制与安全防护系统。

目前,世界轨道交通广泛应用固定自动闭塞系统。固定自动闭塞系统一般以轨道电路实现列车的定位检测,只要列车占用该轨道电路区段任何部位,该区段即处于占用状态,防护该区段的信号机均显示禁止信号,不允许后续列车驶入。显然存在以下缺

点:轨道电路对列车的定位精度“太粗”,影响行车效率;列车无法通过轨道电路得到先行列车的(精确)位置、速度、加速度及其牵引制动性能等列车信息,因而不能实现自身行为的高效调整;固定自动闭塞系统在区间设置轨道电路和信号机,需铺设电缆,建造和维护费用巨大;列车提速情况下列车制动距离加大,对轨道电路区段和信号机往往需重新划分和配置,导致在原有系统上进行技术升级费用庞大,等等。当前,我国铁路进行的“提速”、“挖潜”等技术改造,虽取得了可喜的成绩,但毕竟不能突破固定自动闭塞系统本身的限制,京沪铁路等许多主要干线满表执行或近乎满表执行的刚性运行图,大大降低了

收稿日期: 2007-09-05; 修回日期: 2007-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674076).

作者简介: 潘登(1969—),男,安徽怀远人,讲师,博士,从事智能控制、智能交通等研究;郑应平(1941—),男,福州人,教授,博士生导师,从事智能控制、预测与决策等研究。

列车运行的调控弹性,调控难度也大为增加.因此,对固定自动闭塞系统进行更新换代具有必要性和迫切性,而移动闭塞系统不失为一种有效办法.

对移动闭塞系统而言,列车定位导航数据的精确性、实时性和列车行为调整的自主性是其能否实现列车区间安全、高效行车的关键.

## 2 列车定位导航技术的研究现状

移动闭塞系统主要应用于德、法、日、美等发达国家的城市轨道交通或铁路线路的某一区段.目前,尚未有应用于规模庞大的轨道交通运输网络的报道.移动闭塞系统的主要列车定位技术有:查询/应答器法、轨间感应回线/车载传感器法、机车轮轴转速测定+查询/应答器法、全球卫星定位系统(GPS)、地面无线电定位法、惯性导航系统(INS)、地图匹配(MM)技术等<sup>[1,2]</sup>.但任何一种单独的定位技术都有本身无法克服的缺点,例如:查询/应答器法需密集敷设,才能近乎连续地获得列车位置和速度;轨间感应回线则需要在区间全程铺设;机车轮轴磨损造成测速误差;GPS和地面无线电定位存在“失锁”现象;INS属于完全自主的定位技术,可通过加速度的二次积分进行航迹推算,但测量误差会随着时间不断累积;MM技术一般作为定位导航辅助措施,提供直观导航信息.因此,将上述若干定位技术加以组合,辅以适当的融合算法,“取长补短”,成为近年来智能车辆定位导航研究领域的热点问题.目前,主要组合定位导航系统的方案有:INS/MM, GPS/MM, GPS/INS, GPS/INS/MM等<sup>[2,3]</sup>.

移动闭塞系统中列车必须获得自身及先行列车精确、连续、可靠的列车动态信息(位置、速度、加速度和列车性能等),才能合理地调整自身行为,实现安全、高效运行.因此,本文采用基于GPS/INS/MM的列车组合定位导航方案,一方面利用网络实时动态测量(RTK)技术对列车进行实时精确定位导航,另一方面依靠惯性导航系统增强列车的自主性,使其成为独立的智能主体.在此基础上研究列车定位导航技术的另外两个重要方面:列车信息的移动性管理和数据通信.

## 3 基于GPS/INS/MM的列车组合定位导航技术

### 3.1 GPS/INS/MM定位导航的组合方式

GPS/INS/MM定位导航的组合方式如图1所示.

图中将基于网络RTK技术的GPS作为列车定位导航的主要手段.由于其具有高精度实时定位导航的性能,可将其输出: $p$ (位置), $v$ (速度), $a$ (加速度), $\theta$ (角度), $t$ (时间)通过MM系统直接反映在电

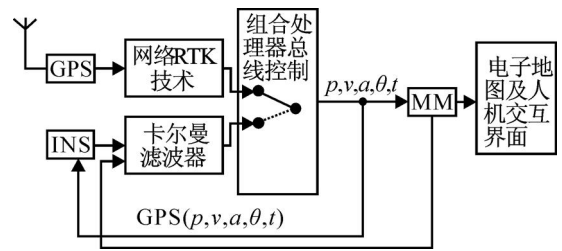


图1 GPS, INS, MM组合定位导航原理

子地图上.当GPS出现信号“失锁”时,组合处理器立即切换到INS,同时将GPS“失锁”前的有效信息( $p, v, a, \theta, t$ )传递给INS并校正其参数,卡尔曼滤波器对MM,INS进行数据融合,形成新的定位导航系统,当GPS正常以后,组合处理器自动切换到GPS系统.

### 3.2 基于网络RTK技术的快速双差算法

RTK技术又称载波相位差分定位技术<sup>[4]</sup>.随着用户站与基准站(或称参考站)之间的距离不断增大,卫星传播信号在用户站与基准站之间的空间差异增大,与之相关的对流层和电离层的误差相关性减小,导致定位精度下降,用户站距基准站一般不超过20 km.

为克服单纯RTK技术的局限性,提高整周模糊度解算的能力和可靠性,扩展观测基线长度,网络RTK技术(即广域载波相位差分定位技术)应运而生.它通过设置多个基准站形成广域差分测量网络.用户站实时向数据处理中心发送自身概略坐标,数据处理中心根据用户概略坐标选择最佳的一组固定基准站,并在该概略位置建立虚拟基准站.由于虚拟基准站距用户站实际位置较近,利用它校正电离层、对流层等引起的误差,从而提高用户站的定位精度.因此,网络RTK技术又被称作虚拟参考站(VRS)技术.

#### 3.2.1 基于列车线路的广域差分测量网络

基准站设置在车站或线路的两侧,形成能覆盖线路的广域测量网络,如图2所示.RTK技术可达到厘米级精度,可通过对列车精确定位监测列车运行状态,包括侧翻、脱轨等复杂情况.

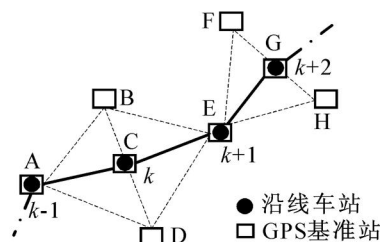


图2 列车运行线路广域差分GPS测量网络

图中,基准站A, C, E, G分别设在第 $k-1, k, k+1, k+2$ 站.考虑到覆盖区域存在复杂地形的情形

时需进行 3 维坐标的计算,规定 4 个基准站组成一个子网.两基准站之间的距离可达到 70 km<sup>[5,6]</sup>.

### 3.2.2 用户概略位置的计算

这里利用伪距差分技术<sup>[4,7]</sup> 计算用户站的概略位置.基准站在  $t_0$  时刻距第  $i$  颗卫星的真实距离和伪距分别为  $R_b^i(t_0)$  和  $\hat{i}_b(t_0)$ ,伪距修正量为

$$\hat{i}_b(t_0) = R_b^i(t_0) - i_b(t_0). \quad (1)$$

考虑到伪距修正量在伪距修正数发送时刻  $t_0$  至伪距修正时刻  $t$  的这一微小时间段内会发生变化,变化率为

$$\dot{\hat{i}}_b(t_0, t) = \dot{i}_b(t_0)/(t - t_0), \quad (2)$$

可得实际加给用户站的伪距修正量为

$$\hat{i}_u(t) = i_b(t_0) + \dot{\hat{i}}_b(t_0, t). \quad (3)$$

进而得到用户站距第  $i$  颗卫星经过修正的伪距为

$$i_{u\text{correct}}(t) = i_u(t) + \hat{i}_u(t), \quad (4)$$

其中  $i_u$  为用户站距第  $i$  颗卫星的伪距.观测 4 颗卫星,可按下式计算用户的概略位置:

$$i_{u\text{correct}}(t) = [(x_v(t) - x^i(t))^2 + (y_v(t) - y^i(t))^2 + (z_v(t) - z^i(t))^2]^{1/2} + Cd. \quad (5)$$

其中:  $(x_v(t), y_v(t), z_v(t))$  为用户站  $t$  时刻的概略坐标;  $(x^i(t), y^i(t), z^i(t))$  为第  $i$  颗卫星  $t$  时刻的坐标;  $C$  为光速;  $d$  为用户钟差.

### 3.2.3 基于网络 RTK 技术的快速差分算法

#### (1) RTK 技术及整周模糊度单差值的计算

根据文献<sup>[4,7]</sup>,可得到基准站与用户站之间的载波相位差分观测方程为

$$R_b^i(t) + N_{bu}^i(t_0) + i_{bu}(t) = [(x^i(t) - x_u(t))^2 + (y^i(t) - y_u(t))^2 + (z^i(t) - z_u(t))^2]^{1/2} + d(t). \quad (6)$$

其中:  $R_b^i(t)$  为基准站到第  $i$  颗卫星的真实距离,为载波波长;  $N_{bu}^i(t_0)$  为基准站与用户站对第  $i$  颗卫星的起始整周模糊度之差;  $i_{bu}(t)$  为载波相位测量差值;  $(x^i(t), y^i(t), z^i(t))$  为第  $i$  颗卫星的 3 维坐标;  $(x_u(t), y_u(t), z_u(t))$  为用户站 3 维坐标;  $d(t)$  为同一观测历元的各项残差.  $R_b^i(t)$ ,  $x^i(t)$ ,  $y^i(t)$ ,  $z^i(t)$  为已知;  $i_{bu}(t)$  可通过载波相位观测值求得;  $N_{bu}^i(t_0)$ ,  $x_u(t)$ ,  $y_u(t)$ ,  $z_u(t)$ ,  $d(t)$  为未知.由于  $d(t)$  在每个历元基本保持不变<sup>[4]</sup>,可认为其为一恒值,不妨令  $d(t) = d$ .

当观测第 5 个历元后,将会得到关于 4 颗卫星共包含 20 个未知数的 20 个单差方程,从而算出  $N_{bu}^i(t_0)$  和  $d$ ;在第 6 个历元,将  $N_{bu}^i(t_0)$  和  $d$  代入式(6)即可得到此刻用户站的新位置坐标,同时利用第 2 历元至第 6 历元的 20 个单差方程计算新

的  $N_{bu}^i(t_0)$  和  $d$ ;如此类推.

显然,上述算法每次需 5 个历元才能计算  $N_{bu}^i(t_0)$  和用户站的当前精确位置,这无疑是导致 RTK 技术初始化时间较长的主要原因之一;另一方面,该算法一般用于整周模糊度的在航解算,对静止用户站不适用,而列车停车是轨道交通领域普遍存在的一种现象.因此,为了增强卫星定位导航的实时性和适用性,本文只利用式(6) 计算整周模糊度单差值  $N_{bu}^i(t_0)$ : 将用户站概略位置坐标代入式(6) (即  $x_u(t) = x_v(t), y_u(t) = y_v(t), z_u(t) = z_v(t)$ ),可得到关于 4 颗卫星的单差方程,进而解出用户站概略位置的  $N_{bu}^i(t_0) (i = 1, 2, \dots, 4)$ ,  $d(t) = d$ .  $N_{bu}^i(t_0)$  可用于双差方程的计算,如式(22) 所示.

#### (2) 广域差分测量网络双差修正值的计算与精确定位

由文献<sup>[4]</sup>可知,基准站对第  $i$  颗卫星的线性化载波相位观测方程为

$$i_b(t) = R_b^i(t) + C(t_b(t) - t^i(t)) - N_{b}^i(t_0) + I_b^i(t) + T_b^i(t). \quad (7)$$

其中:  $\lambda$  为载波波长,  $i_b(t)$  为从起始观测历元  $t_0$  至历元  $t$  的载波相位,  $R_b^i(t)$  为基准站至第  $i$  颗卫星的真实距离,  $C$  为光速,  $t_b(t)$  为基准站钟差,  $t^i(t)$  为第  $i$  颗卫星的钟差,  $N_{b}^i(t_0)$  为整周模糊度,  $I_b^i(t)$  为电离层延迟偏差,  $T_b^i(t)$  为对流层延迟偏差.

#### 1) 站际单差方程

设  $m, n$  为广域差分测量网络的两个基准站,他们对第  $i$  颗卫星的单差方程为

$$i_{mn}^i(t) = R_{mn}^i(t) + C(t_{mn}(t) - N_{mn}^i(t_0) + I_{mn}^i(t) + T_{mn}^i(t)). \quad (8)$$

同理,用户站  $u$  和虚拟基准站  $v$  对第  $i$  颗卫星的单差方程为

$$i_{uv}^i(t) = R_{uv}^i(t) + C(t_{uv}(t) - N_{uv}^i(t_0) + I_{uv}^i(t) + T_{uv}^i(t)), \quad (9)$$

可见站际单差方程消除了卫星钟差.

#### 2) 站 - 星双差方程

站 - 星双差算子  $\nabla$  定义为先对站际单差,再对星际单差.基准站  $m, n$  与第  $i, j$  颗卫星的双差方程为

$$\nabla i_{mn}^{ij}(t) = \nabla R_{mn}^{ij}(t) - \nabla N_{mn}^{ij}(t_0) + \nabla I_{mn}^{ij}(t) + \nabla T_{mn}^{ij}(t), \quad (10)$$

$$\nabla i_{uv}^{ij}(t) = \nabla R_{uv}^{ij}(t) - \nabla N_{uv}^{ij}(t_0). \quad (11)$$

显然,双差方程又消除了测站(基准站、虚拟基准站、用户站) 钟差.对式(10), (11) 进行变换,有

$$(\nabla i_{mn}^{ij}(t) + \nabla N_{mn}^{ij}(t_0)) - \nabla R_{mn}^{ij}(t) =$$

$$\nabla I_{mn}^{ij}(t) + \nabla T_{mn}^{ij}(t), \quad (12)$$

$$(\nabla i_{iw}^{ij}(t) + \nabla N_{iw}^{ij}(t_0)) - \nabla R_{iw}^{ij}(t) = 0. \quad (13)$$

令

$$\mu_{mn}^{ij}(t) = (\nabla i_{mn}^{ij}(t) + \nabla N_{mn}^{ij}(t_0)) - \nabla R_{mn}^{ij}(t) = \nabla I_{mn}^{ij}(t) + \nabla T_{mn}^{ij}(t), \quad (14)$$

$$u_{iw}^{ij}(t) = (\nabla i_{iw}^{ij}(t) + \nabla N_{iw}^{ij}(t_0)) - \nabla R_{iw}^{ij}(t) = 0. \quad (15)$$

由于  $u_{mn}^{ij}, u_{iw}^{ij}$  是由线性化载波相位观测方程(7)推导而来,不失合理性,假设它们在如图2所示的广域差分测量网络的覆盖区域内是线性变化的,且是相应站点(基准站、虚拟基准站、用户站)之间坐标差的线性函数.对基准站 ABCD 覆盖的区域而言,以距列车(用户站)最近的基准站为主参考点(假设为 A),建立如下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} u_{AB}^{ij}(t) \\ u_{AC}^{ij}(t) \\ u_{AD}^{ij}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A - x_B & y_A - y_B & z_A - z_B \\ x_A - x_C & y_A - y_C & z_A - z_C \\ x_A - x_D & y_A - y_D & z_A - z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

其中:  $(x_A, y_A, z_A), (x_B, y_B, z_B), (x_C, y_C, z_C), (x_D, y_D, z_D)$  为基准站 A, B, C, D 的 3 维坐标;  $k_1, k_2, k_3$  为历元  $t$  时刻的待求系数.同理得

$$u_{Av}^{ij}(t) = k_1(x_A - x_v) + k_2(y_A - y_v) + k_3(z_A - z_v), \quad (17)$$

虚拟基准站距离列车(用户站)很近,  $u_{Av}^{ij}(t)$  因此,可将  $u_{Av}^{ij}(t)$  作为内插修正值传播给列车(用户站)进行双差修正.

由式(14)可知

$$u_{Av}^{ij}(t) = (\nabla i_{Av}^{ij}(t) + \nabla N_{Av}^{ij}(t_0)) - \nabla R_{Av}^{ij}(t), \quad (18)$$

可得

$$\nabla R_{Av}^{ij}(t) = (\nabla i_{Av}^{ij}(t) + \nabla N_{Av}^{ij}(t_0)) - u_{Av}^{ij}(t). \quad (19)$$

其中

$$\nabla i_{Av}^{ij}(t) = i_{Av}^{ij}(t) - j_{Av}^{ij}(t), \quad (20)$$

$$\nabla i_{iw}^{ij}(t) = i_{iw}^{ij}(t) - j_{iw}^{ij}(t), \quad (21)$$

$$\nabla N_{Av}^{ij}(t_0) = N_{Av}^{ij}(t_0) - N_{Av}^{ij}(t_0). \quad (22)$$

这里:  $i_{Av}^{ij}(t), j_{Av}^{ij}(t), i_{iw}^{ij}(t), j_{iw}^{ij}(t)$  可通过载波相位观测值得得;  $N_{Av}^{ij}(t_0), N_{Av}^{ij}(t_0)$  可通过(1)节的方法求得.双差方程(19)不仅消除了用户钟差和卫星钟差,而且利用虚拟基准站计算出内插修正值  $u_{Av}^{ij}(t)$  对电离层偏差和对流层偏差进行了修正.

因此,通过对  $\nabla R_{iw}^{ij}(t)$  的计算可得到用户站(列车)的精确位置  $(x_u(t), y_u(t), z_u(t))$ .

对于运行中的列车而言,在下一时刻将求得的  $(x_u(t), y_u(t), z_u(t))$  代入式(6)可分别得到关于 4 颗卫星的差分方程,从而解出新的  $N_{Av}^{ij}(t_0)$  和  $N_{Av}^{ij}(t_0)$ ,再代入式(19)求解此时新的用户站(列车)位置.相比双频伪距法<sup>[8]</sup>,AFM(Ambiguity function method)<sup>[9]</sup>,FARA(Fast ambiguity resolution approach)<sup>[10]</sup>,LAMBDA(Least squares ambiguity decorrelation adjustment)<sup>[11]</sup>等,上述迭代算法适用于动、静两种状态的用户站,具有适用范围广、算法简洁、初始化时间短的特点,特别适用于对实时性要求高的列车定位导航系统.

列车运行在线路上时,通过在不同历元实时测算出的精确定位信息,可得到自身的速度和加速度.若再通过 GPRS 通信链路实时获得相邻列车的相关信息和线路信息,则可做到“知彼知己”,从而能采取合理的列车运行控制策略,实现移动闭塞条件下的安全高效行车.

### 3.3 列车信息的移动性管理

列车牵引重量、长度、牵引制动能力的变化以及对前一个区间列车追踪关系的改变,一般均在车站进行,主要表现为交会、避让、越行、摘挂、解编、更换机车等作业情况.而在区间列车根据线路状况以及自身与先行列车的性能、空间距离和各自运行情况调整自身行为、或列车出现分离等,必然引发列车行为的变化或导致列车丧失完整性.上述情况将导致列车信息发生改变.显然,没有对列车信息的有效管理,就不能对列车运行,特别是列车追踪运行进行安全高效的定位导航服务,就难以实现列车运行的安全控制和防护,也无法充分发挥移动闭塞系统的积极作用.

图3描述了线路上第  $k$  个车站及区间  $[k, k+1]$  上行方向列车信息动态管理的过程.

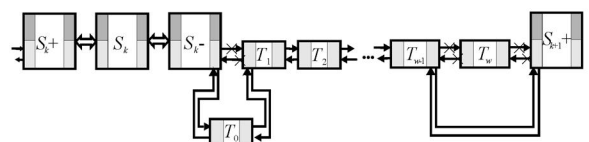


图3 列车信息的移动性管理

图中:  $S$  表示“上行方向”;  $k$  表示车站的编号; “+”, “-”分别表示车站接、发车作业;每个车站分别设立  $S_{k+}, S_k, S_{k-}$  3个信息实体对与车站  $k$  有关的列车进行信息管理.其中:  $S_{k+}$  用于记录车站建立接车进路和列车从区间驶入、动态占用进路的全过程;  $S_k$  用于记录除接发车作业外的列车站内停车、

通过、摘挂、解编和更换机车等作业情况及其站内位置等信息;  $S_k$  - 用于记录车站建立发车进路和列车动态占用进路、驶入区间的全过程; 建立区间  $[k, k + 1]$  上行方向的列车信息存储结构, 用于记录列车在区间的运动行为等信息. 同理, 下行方向各车站列车信息的动态存储也可做上述处理.

这里约定: 列车信息的变更, 一般由调度中心授权车站具体完成. 车站发车前必须检查列车的完整性、列车信息的一致性及其实时更新情况, 只有满足条件的列车才能进入发车状态; 列车进入发车状态, 应检查与前方区间列车运行方向是否一致, 满足条件才允许建立发车进路, 列车完全越过进站信号机 (区间一般以此为界), 即由发车环节  $S_k$  - 进入区间列车信息管理环节; 列车进入进站信号机内方, 即由车站接车环节  $S_{k+1}$  对列车信息进行管理; 列车进行除接发车之外的站内其他作业, 由站内环节  $S_k$  进行列车信息管理.

在区间, 采用双向链表实现列车信息的移动性管理, 如图 3 所示. 链表是一种有若干相同类型数据元素组成的、可在任意位置进行插入和删除操作的线性链式存储结构<sup>[12]</sup>. 由于运行于同一区间的列车相互之间的空间关系一般不会改变, 有必要对双向链表的某些功能进行“屏蔽”. 通常情况下, 除发车站向链表插入“列车”和接车站将“进站列车”从链表中删除外, 不允许对链表进行其他任何形式的“插入”和“删除”操作; 只有在有列车脱轨、翻车等特殊情况下, 经上级调度 (控制) 中心授权, 才能向相关车站开放这些功能, 而且车站必须严格按照授权内容进行相关作业. 图 3 描述了车站  $k$  上行发车,  $k + 1$  站上行接车和区间  $[k, k + 1]$  上行方向列车信息链表的变化情况, 其中  $T_0, T_1, \dots, T_w$  ( $w$  为区间当前列车的数量) 为封装列车信息的实体, 并能实时反映列车信息的动态变化. 区间列车信息链表有助于增强列车对通信对象的识别能力, 增加列车信息传递的目的性, 从而减少通信资源的开销. 由此可见, 对列车信息进行管理, 是将信息及时传递到相关列车, 进而实现区间列车运行控制和安全防护的前提.

### 3.4 基于 GPRS 的数据通信

对于列车运行, 特别是列车追踪运行进行精确定位导航, 实现区间列车运行自动控制, 提高行车安全性和效率, 必须将列车信息和各种调度指令及时传递到相关列车. 图 4 给出了包含 GPRS 模块的列车 (用户站) 硬件结构.

GPRS 采用基于分组交换的无线 IP 技术, 具有自组织性, 可为移动列车分配 C 类动态 IP 地址, 并能根据移动闭塞系统的特点和列车信息区间链表,

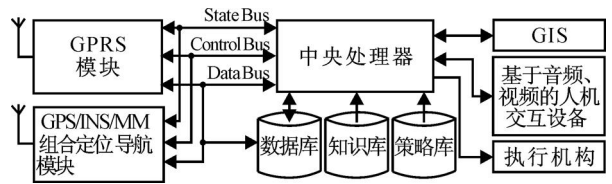


图 4 列车 (用户站) 硬件结构

提供点对点业务 (PTP) 和点对多点业务 (PTM). 网络接入时间短, 列车一旦接入 GPRS 网络就永远在线, 随时可通过高速通信链路实时、高效地收发数据<sup>[13]</sup>. 站车之间和列车之间借助 GPRS 网络进行交流互动, 有助于增进彼此了解和实时更新相关信息, 实现列车运行自控制和安全防护, 从而达到安全、高效行车的目的.

### 4 仿真分析

某线路广域差分测量网络如图 2 所示的 BCDE 区域, 各基准站间的距离为  $2L_{BC} = 2L_{CD} = L_{BD} = L_{BE} = L_{DE} = 70.00 \text{ km}$ ,  $L_{CE} = 60.62 \text{ km}$ , 列车由 C 站驶向 E 站, 平均运行速度为  $120 \text{ km/h}$ . 列车实际坐标为  $(x_u(t), y_u(t), z_u(t))$ , 解算出的坐标为  $(x_u^*(t), y_u^*(t), z_u^*(t))$ , 列车运行过程中其坐标处在动态变化中. 令

$$\text{error}(t) = [(x_u^*(t) - x_u(t))^2 + (y_u^*(t) - y_u(t))^2 + (z_u^*(t) - z_u(t))^2]^{1/2}, \tag{23}$$

实验结果如图 5 所示.

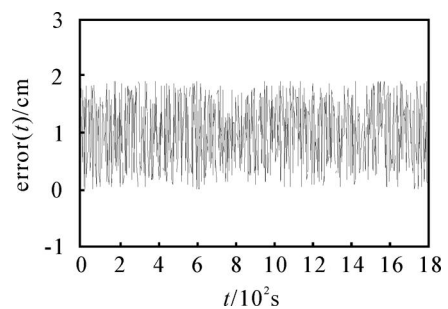


图 5 快速差分算法的定位误差

由于利用伪距差分计算列车概略位置, 初始化延时仅为  $0.583 \text{ s}$ , 其误差  $\text{error}(0.583)$  为  $12.138 \text{ m}$  (为了清晰观察网络 RTK 技术的测量精度, 图中坐标对其做了截断处理). 列车从 C 站到达 E 站的平均测量误差为  $\text{error} = 1.332 \text{ cm}$ , 可满足移动闭塞系统列车运行实时精确定位导航的要求.

### 5 结 论

列车定位导航技术对轨道交通移动闭塞系统至关重要, 不仅要实现列车定位导航的精确性, 而且要考虑列车行为调整的安全性、自主性和实时性. 为此进行了深入的理论探讨, 并就网络 RTK 定位快速差分算法进行了仿真分析, 初步验证了其用于“实

时、精确”定位导航的可行性. 将 INS/MM 与网络 RTK 技术相结合, 增强了列车的自主性能. 移动闭塞系统是当今先进列车控制技术, 属于分散递阶的大规模复杂系统, 下一阶段将结合轨道运输网络的拓扑结构和管理特点继续深入研究.

### 参考文献(References)

- [1] 刘进, 吴汶麒. 轨道交通列车定位技术[J]. 城市轨道交通研究, 2001, 4(1): 30-35.  
(Liu J, Wu W Q. Train positioning technology of railway and mass transit[J]. Urban Mass Transit, 2001, 4(1): 30-35.)
- [2] 汪希时. 智能铁路运输系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 218-222.  
(Wang X S. Intelligent railway transport system[M]. Beijing: China Railway Press, 2004: 218-222.)
- [3] 富立, 范耀祖. 车辆定位导航系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 6-14.  
(Fu L, Fan Y Z. Positioning and navigation system for vehicle[M]. Beijing: China Railway Press, 2004: 6-14.)
- [4] 袁建平, 罗建军, 岳晓奎, 等. 卫星导航原理与应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2004: 224-263, 131-136.  
(Yuan J P, Luo J J, Yue X K, et al. Satellite navigation system: Principle and Application[M]. Beijing: China astronautic Publishing House, 2004: 224-263, 131-136.)
- [5] 王文忠, 郑国宁, 郑生春, 等. GPS 参考站网络技术[J]. 测绘学院学报, 2002, 19(3): 171-173.  
(Wang W Z, Zheng G N, Zheng S C, et al. GPS virtual reference station network[J]. J of Institute of Surveying and Mapping, 2002, 19(3): 171-173.)
- [6] 王志豪. 虚拟参考站技术在工程测量中的应用[J]. 测绘通报, 2004, 33(11): 64-65.  
(Wang Z H. Application of virtual reference station to engineering survey [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004, 33(11): 64-65.)
- [7] 王广运, 郭秉义, 李洪涛. 差分 GPS 定位技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996: 127-134.  
(Wang G Y, Guo B Y, Li H T. Differential GPS positioning technology and its application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1996: 127-134.)
- [8] Goad C. Robust technique for determining GPS phase ambiguities[C]. Proc of the 6th Int Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Columbus, 1992: 245-254.
- [9] Mader G L. ambiguity function techniques for GPS phase initialization and kinematic solutions[C]. Proc of the 2nd Int Symposium on Precise Positioning System. Ottawa, 1990: 1233-1247.
- [10] Frei E, Beutler G. Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach 'FARA': Theory and first results[M]. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990: 325-356.
- [11] Teunissen P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation[J]. J of Geodesy, 1995, 70(1/2): 65-82.
- [12] 朱战立. 数据结构——使用 C++ 语言[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2001: 63-73.  
(Zhu Z L. Data structure: Use of C++ language [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001: 63-73.)
- [13] 张正烜, 张其善. 基于 GPRS 的车载信息平台的研制与关键技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(1): 98-101.  
(Zhang Z X, Zhang Q S. In-vehicle information platform based on GPRS[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(1): 98-101.)

(上接第 1304 页)

- [8] 王蓬, 李少远. 一类非线性系统的多模型预测控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1113-1118.  
(Wang P, Li S Y. Multiple model-based predictive control for a class of nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1113-1118.)
- [9] 郑涛, 何德峰, 陈薇, 等. 快速阶梯式非线性预测控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5206-5209.  
(Zheng T, He D F, Chen W, et al. Fast stair-like nonlinear model predictive control algorithm[J]. J of System Simulation, 2007, 19(22): 5206-5209.)
- [10] Cannon M. Efficient nonlinear model predictive control algorithms[J]. Annual Reviews in Control, 2004, 28(2): 229-237.
- [11] Zheng A, Zhang W H. Computationally efficient nonlinear model predictive control algorithm for control of constrained nonlinear systems [C]. Nonlinear Predictive Control: Theory and Practice. London: The Institution of Electrical Engineers, 2001: 173-187.
- [12] Sontag E D. A 'universal' construction of Artstein's theorem on nonlinear stabilization [J]. Systems and control Letters, 1989, 13(2): 117-123.
- [13] Sepulchre R, Jankovic M, Kokotovic P. Constructive nonlinear control [M]. Heidelberg: Springer - Verlag Berlin, 1997.