

文章编号:1004-9037(2014)05-0770-07

# 面向实际道路网络的浮动车采样间隔优化方法

曹 闻<sup>1</sup> 彭 煊<sup>2</sup>

(1. 解放军信息工程大学地理空间信息学院, 郑州, 450052; 2. 中国人民解放军 61922 部队, 北京, 100120)

**摘要:** 目前基于浮动车的城市交通信息采集通常采用等间距进行采样, 无法根据道路网络几何条件和状态的差异进行合理的采样间隔优化。针对现有采样算法的不足, 本文提出了一种面向实际道路网络的浮动车采样间隔优化方法。首先通过构建四叉树模型对城市道路网络进行划分, 确定空间采样分辨率, 然后利用历史轨迹对浮动车的速度进行短时预测, 最后在不影响空间采样分辨率的基础上实时动态优化采样间隔, 在交通信息的精度与信息的采集成本之间取得平衡。通过仿真试验的定性定量分析, 新算法能够在不同复杂程度的道路网络情况下动态调整采样间隔, 不仅确保了采样数据的精度, 而且降低了采样数据容量。

**关键词:** 智能交通系统; 浮动车; 数据采样; 道路网络复杂度

中图分类号: V249.32

文献标识码: A

## Real Road Network Oriented Optimization Method of Floating Car Sampling Interval

Cao Wen<sup>1</sup>, Peng Xuan<sup>2</sup>

(1. Geospatial Information Institute, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, 450052, China;  
2. Troops 61922, PLA, Beijing, 100120, China)

**Abstract:** The technologies of traffic information collection using floating car equipped GPS have been become one of the main important means for real-time collecting traffic information in intelligent transportation system. The intervals of traditional traffic information collection technologies using floating car equipped GPS are simplex and equivalent at present. The sampling interval cannot be obtained according to geometric condition of road network and diversity of traffic status. Aiming at the ineffectiveness of the existing sampling interval algorithms, a real road network oriented optimization method of floating car sampling interval is proposed. Firstly, the urban road network is divided via quad-tree model. Thereby, the spatial sampling resolution can be acquired; Secondly, the short-term speeds of floating car are predicted according to the history track; Finally, the optimal sampling intervals are obtained, simultaneously, the spatial sampling resolution cannot be influenced. The results of simulation and experiment show that the sampling interval can be dynamically determined under the circumstances of different complexities of road network. The sampling result can not only ensure sampling data precision, but also reduce data capacity.

**Key words:** intelligent transportation system; floating car; data sampling; complexity of road network

## 引 言

交通信息是支持智能交通系统的重要基础。

随着 3S 技术、无线通信、汽车产业的发展, 通过安装 GPS 和通讯设备的浮动车采集车辆行驶信息, 然后配合车辆管理系统、地理信息系统和数据挖掘技术获取动态实时交通信息的技术已经成为了交

通信息获取技术的研究热点<sup>[1]</sup>。它具有成本低、覆盖广、全天候、全天时、精度高等优点,与传统人工方式或者固定采集方式相比具有明显的优势。

对基于浮动车的交通信息采集技术来说,一个最基本的问题是浮动车 GPS 数据的采样间隔如何确定<sup>[2]</sup>。因为采样间隔过小,虽然可以精确地描述交通信息,但是会造成较大的数据冗余和无线网络的过重负载;采样周期过大,虽然减小了数据冗余和系统服务负载,但是会降低数据描述交通信息的精度。因此,交通信息的精度与信息的采集成本是优化浮动车采样间隔应该考虑的关键因素。

目前,采样间隔确定方法主要分为3大类:主观确定法<sup>[1]</sup>、统计分析法<sup>[2-3]</sup>和动态调整法<sup>[4-5]</sup>。主观确定法大多依赖主观经验确定采样间隔,由于操作人员的实际经验存在差别,导致没有规律可循,不具备通用性。统计分析法通过对历史数据进行统计分析,进而设计最优采样间隔。文献<sup>[2]</sup>利用傅里叶变换得到速度信号的频谱,然后根据 Shannon 采样定理,确定浮动车在不同等级公路上的最优采样间隔。文献<sup>[3]</sup>是对浮动车速度划分区间确定不同采样间隔。动态调整法是根据浮动车所在道路或区域和浮动车实时速度进行动态采样,即速度越快采样间隔越短,反之采样间隔越长。虽然这类算法考虑到了道路差异,但要求浮动车定位设备具备电子地图并存储大量的道路或区域经验信息,而目前用于浮动车的车辆大多是不具备电子地图的出租车,同时地图数据的更新和实时地图匹配误差会引入较大的粗差,因此其实用性存在较大的局限性。总而言之,目前的采样间隔方法没有综合考虑浮动车速度差异、路网的拓扑关系和几何特性,没有精细地刻画各种交通管制手段以及不同交通状态的影响,不能很好地满足交通信息采集系统的要求。因此,本文提出了一种面向实际道路网络的浮动车采样间隔优化方法。首先通过构建四叉树模型对城市道路网络进行划分,确定空间采样分辨率,然后利用历史轨迹对浮动车的速度进行短时预测,最后在不影响空间采样分辨率的基础上实时动态优化采样间隔,在交通信息的精度与信息的采集成本之间取得平衡。仿真试验表明,新方法能够在不同复杂程度的道路网络情况下动态调整采样间隔,不仅确保了采样数据的精度,而且降低了采样数据容量,满足实用要求。

## 1 面向实际道路网络的浮动车采样间隔优化方法

### 1.1 基本思想

浮动车信息采样间隔确定的理想原则应该是:既能准确地描述交通信息,又能避免数据的冗余。因此对于不同复杂程度的道路网络需要制定不同的采样间隔,即保证一个合适的采样空间分辨率  $S$ ,当目标运动过快时采样间隔应小;反之采样间隔应大。

不妨假设浮动车在  $t$  时刻的速度为  $v_t$ ,则浮动车的采样间隔  $I(t)$  为<sup>[4]</sup>

$$I(t) = \frac{S}{v_t} \quad (1)$$

式中:  $S$  表示采样空间分辨率。

本文通过确定特定时刻的采样空间分辨率  $S$  和浮动车瞬时速度  $v_t$ ,综合考虑了城市道路网络中不同道路的拓扑关系和几何特性,从而确定最优采样间隔。

### 1.2 采样空间分辨率

为了确保交通信息的有效性和实时性,有必要对不同几何关系和交通状态的道路采取不同的采样间隔。因此,合理地确定不同道路区域的采样空间分辨率对于提高交通信息可靠性具有重要意义。为了区别对待不同拓扑关系和属性特征的道路,本文借鉴地形复杂模型原理<sup>[6]</sup>构建了道路网络复杂度四叉树模型:(1)根据道路的拓扑关系和几何特征对道路进行路段划分;(2)对子路段进行抽象点简化并构建其复杂因子;(3)通过计算道路路段抽象点的平均路网复杂度完成四叉树模型的构建。

进而给出采样空间分辨率的计算公式

$$S = \frac{\min\{W_{ht}, H_{ht}\}}{n} \quad (2)$$

式中:  $W_{ht}$ ,  $H_{ht}$  分别表示浮动车位置处于四叉树模型结点对应格网的宽度和高度,  $n$  表示四叉树结点对应格网内结点和道路与格网边界交点构成狄络尼三角形<sup>[6]</sup>的个数。

#### 1.2.1 路段划分

考虑到同一道路路段不同位置、不同时间的交通状态的不均衡性,本文对道路长度较大的弧段进行进一步的细化划分。细化划分原则应该遵循规的规则<sup>[7]</sup>为:(1)道路弧段的长度大于细化阈值长度  $\epsilon$ ;(2)细化弧段能够充分描述不同位置的交通状态。显然,路段细化阈值决定着道路  $R_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )是否进一步细化的关键所在。

根据描述道路路段交通状态至少须两个浮动  
车采样点的原则,则每条道路  $R_i$  在  $t$  时刻对应的  
细化临界长度  $\epsilon_i(t)$  为

$$\epsilon_i(t) = I_i(t)\bar{v}_i + 2\theta_p \quad (3)$$

式中:  $\theta_p$  表示试验数据噪声(如 GPS 定位误差);  $\bar{v}_i$   
表示道路  $R_i$  的设计速度;  $I_i(t)$  表示  $t$  时刻道路  $R_i$   
上浮动车的采样间隔。这里需要说明的是:用于路  
段划分的采样间隔  $I_i(t)$  并非是浮动车的最终采  
样间隔,使用傅里叶频谱分析和 Shannon 采样定  
理进行确定<sup>[2]</sup>。

在得到细化临界长度  $\epsilon_i(t)$  之后,对于路段长  
度  $l_i < \epsilon_i(t)$  的道路  $R_i$  不做进一步的划分(如图 2  
(a)所示),而路段长度  $l_i \geq \epsilon_i(t)$  的道路  $R_i$  则将进  
一步划分。考虑到道路交叉口对于其关联道路交  
通状态的重要影响,因此需要对道路的不同位置加  
以区分,如图 1 所示。

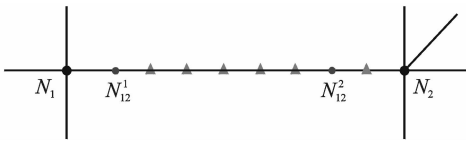


图 1 道路路口临近子路段和中央子路段剖分原理示意图  
Fig.1 Schematic of road junction near the central sub-  
sections and sub-sections split

图 1 的基本思想是:将道路分为路口临近子路  
段  $N_1N_{12}^1, N_{12}^2N_2$  和中央子路段  $N_{12}^1N_{12}^2$ , 其中结  
点  $N_1, N_2$  对应着道路交叉口。由于结点  $N_2$  关联  
的道路数目大于结点  $N_1$  关联的道路数目,因此  
 $N_{12}^2N_2$  子路段交通状态要比  $N_1N_{12}^1$  子路段交通  
状态更为复杂。由此可见,如何确定  $N_1N_{12}^1$ ,  
 $N_{12}^1N_{12}^2, N_{12}^2N_2$  子路段是区分道路路段上不同位  
置交通状态的关键。通常意义上,车辆在路口临近  
路段和中央路段进行切换行驶的速度有较大的  
变化。因此,可以通过统计历史轨迹信息寻找随  
时时间变化速度曲线的二阶过零点加以确定

$$\frac{\partial V^2(p, t)}{\partial p^2} = 0 \quad (4)$$

式中:  $V(p, t)$  表示  $t$  时刻浮动车在道路路段  
 $p: (x, y)$  位置的速度。由于历史轨迹噪声  $\zeta$  的存  
在,则式(4)为

$$\frac{\partial V^2(p, t)}{\partial p^2} \leq \zeta \quad (5)$$

如果所获历史轨迹速度过于平稳,则通过式  
(6)确定。

$$l(N_{ij}, N_{ij}^k) = l_r + \theta_p \quad (6)$$

式中:  $l_r$  是道路交叉口修正长度;  $i, j$  表示结点编

号;  $k$  表示路口临近子路段相邻结点的编号。

### 1.2.2 结点划分

对路段划分结果进一步进行结点划分。其基  
本思想如下:

(1) 对于道路长度小于细化临界长度  $\epsilon_i(t)$  而  
未进行路段划分的道路,由于这些路段通常是交叉  
路口连接路段(如图 2 中的黑色圆点),因此将该路  
段的起始和末尾端点作为结点。

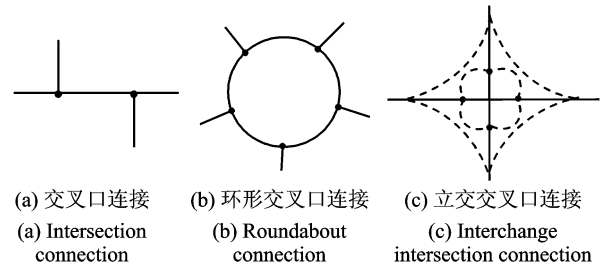


图 2 未经路段划分的道路路段结点划分原理示意图  
Fig.2 Schematic of road sections junction division

(2) 对于经过路段划分的道路路段,对划分的  
子路段取中间点作为该子路段的结点(如图 3 中的  
方点),同时将子路段中原始道路交叉口结点也作  
为道路路段结点。

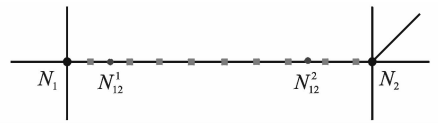


图 3 经路段划分的道路路段结点划分原理示意图  
Fig.3 Schematic of sections divided by a road link  
nodes

### 1.2.3 结点路网几何拓扑复杂因子

假设经过路段划分和结点划分的结点为  $n_j^k$ ,  
 $j, k$  分别表示结点序号索引及结点类型。其中,如  
图 3 中的  $N_1, N_2$  对应的结点类型  $k=1$ ;  $N_1N_{12}^1$ ,  
 $N_{12}^2N_2$  子路段之间的结点类型  $k=2$ ;  $N_{12}^1N_{12}^2$  子路  
段之间的结点类型  $k=3$ 。

道路的数量、布局以及其属性的不同决定着城  
市道路网络的几何拓扑复杂度,因此作为道路网络  
抽象的结点  $n_j^k$  对道路网络复杂度的复杂因子  $c_j^k$  就  
可以定义为其关联道路属性的函数

$$c_j^k = f\{n_j^k | g_j^1, g_j^2, g_j^3, g_j^4, g_j^5, \dots\} \quad (7)$$

式中:  $g_j^1, g_j^2, g_j^3, g_j^4, g_j^5, \dots$  分别表示结点  $n_j^k$  关联  
道路  $R_i$  的平均实际道路拥塞程度(可根据实时路  
况信息系统的历史信息对每条道路定期更新)、个  
数因子、等级因子、车道因子、宽度因子等。

由于每个复杂因子的单位不同,因此需要对每

个影响因子进行归一化。如个数因子  $g_j^2$  定义为

$$g_j^2 = \frac{C_j(R_i)}{C_{\max}} \quad (8)$$

式中:  $C_j(R_i)$  表示结点  $n_j^k$  关联道路的个数,  $C_{\max}$  表示道路网络中交叉口结点关联道路个数的最大值。

为了区分不同道路属性以及同一道路不同位置对道路交通状态不同程度的影响,本文为结点  $n_j^k$  关联道路  $R_i$  的归一化属性设定了不同的权值  $\lambda_j^s(k)$ , 并满足以下两个条件:

(1) 道路属性因子差异条件:  $\lambda_j^1(k) \geq \lambda_j^2(k) \geq \lambda_j^3(k) \geq \lambda_j^4(k) \geq \lambda_j^5(k) \geq \dots$ 。

(2) 道路路段位置差异条件:  $\lambda_j^s(1) \geq \lambda_j^s(2) \geq \lambda_j^s(3)$ , 式中  $s=1, 2, \dots$  表示道路属性次序。

使用基于权重修正证据融合方法<sup>[8]</sup>定义结点  $n_j^k$  对道路网络的复杂度的影响因子  $c_j^k$  为

$$c_j^k = \sum_{i=1}^n \lambda_j^i(k) \times g_j^i \quad (9)$$

### 1.2.4 道路网络四叉树模型

在完成城市道路网络的路段划分和路段结点划分之后,如图 4 所示对城市道路网络区域按照四等分原则<sup>[6]</sup>进行剖分,其基本过程如下:

(1) 根据待剖分区域内的结点的分布情况,计算落在该区域内所有结点对城市道路网络复杂度的影响因子  $c_j^k$ , 从而得到该区域的道路网络复杂度影响因子  $\tilde{c}_{ht}$

$$\tilde{c}_{ht} = \begin{cases} \frac{1}{N_{ht}} \sum c_j^k & N_{ht} \neq 0 \\ T_c - 1 & N_{ht} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $N_{ht}$  表示四叉树第  $h$  级第  $t$  ( $t=1, 2, \dots, 2^{2h}$ ) 个格网内结点的个数。

(2) 当待剖分区域的道路网络复杂度影响因子  $\tilde{c}_{ht} \geq \xi_c$  ( $\xi_c$  是判断该区域是否进一步细分的阈值)时,对该区域进行 4 等分生成该区域的 4 个子区域,再将区域内所有的结点配置到新的子区域内,然后将该区域属性修改为根,而新的 4 个子区域的属性配置为叶。

(3) 重复步骤(1)和(2),直到所有叶子区域的道路网络复杂度影响因子  $\tilde{c}_{ht} < \xi_c$  为止。

经过如上区域的剖分,得到城市实际道路网络四叉树模型,即:道路稀疏的地方,四叉树结点区域间距大一些;道路稠密的地方,四叉树结点区域间距小一些。

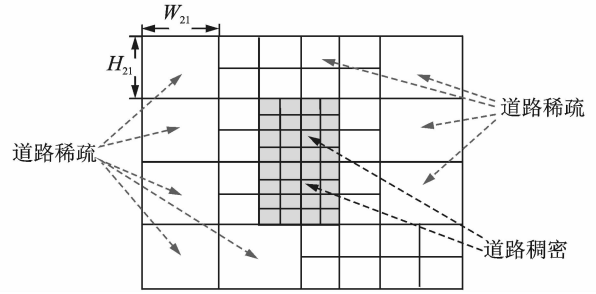


图 4 城市实际道路网络复杂度模型  
Fig. 4 Actual complexity of urban road network model

### 1.3 速度 $v_t$

考虑到浮动车的行驶状态具备马尔科夫和短时平稳性,因此可以通过历史轨迹对速度进行短时预测,然后将轨迹运行趋势考虑到采样算法中。考虑到浮动车定位设备的定位频率为 1 s,本文使用指数平滑法对速度进行短时预测<sup>[9]</sup>

$$\hat{v}_{t+1} = \alpha v_t + \alpha(1 - \alpha) v_{t-1} + \dots \quad (11)$$

式中:  $v_t, v_{t-1}, v_{t-2}, \dots$  表示浮动车的实际观察速度,  $\hat{v}_{t+1}$  表示  $t+1$  时刻的估计速度,  $\alpha \in (0, 1)$  为估计系数。

为了防止因某个位置点上速度存在较大误差导致的采样间隔过分抖动,因此本文使用一定预测时间内的平均速度  $\bar{v}_t$  代替  $t$  时刻的速度。

$$\bar{v}_t = \frac{1}{s+1} (v_t + \hat{v}_{t+1} + \dots + \hat{v}_{t+s}) \quad (12)$$

### 1.4 浮动车采集间隔优化方法

当浮动车首次启动时,应用服务器向浮动车发送浮动车所在城市实际道路网络四叉树模型;然后根据式(2)计算动态优化采样间隔  $I(t)$ , 向服务器发送实时采样数据,从而达到既覆盖行驶道路路段又降低数据量的目的。

由于道路网络拥塞以及交通管制等原因,浮动车有时处于静止状态 ( $\bar{v}_t = 0$ ), 因此需制定固定采样间隔  $T_I$ , 则浮动车的采样间隔  $I(t)$  为

$$I(t) = \begin{cases} T_I & \bar{v}_t < \xi_v \\ \frac{S}{\bar{v}_t} & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\xi_v$  表示浮动车处于静止状态的速度阈值。

## 2 仿真试验

本文试验集是采集于工作日 06:30~21:00 时间段、覆盖某市区的 GPS 信息点集(采样间隔为 1 s)。首先给出了试验区内代表典型 6 种等级的 6

条道路上的浮动车历史行驶速度信号的频谱信息,如图 5 所示。

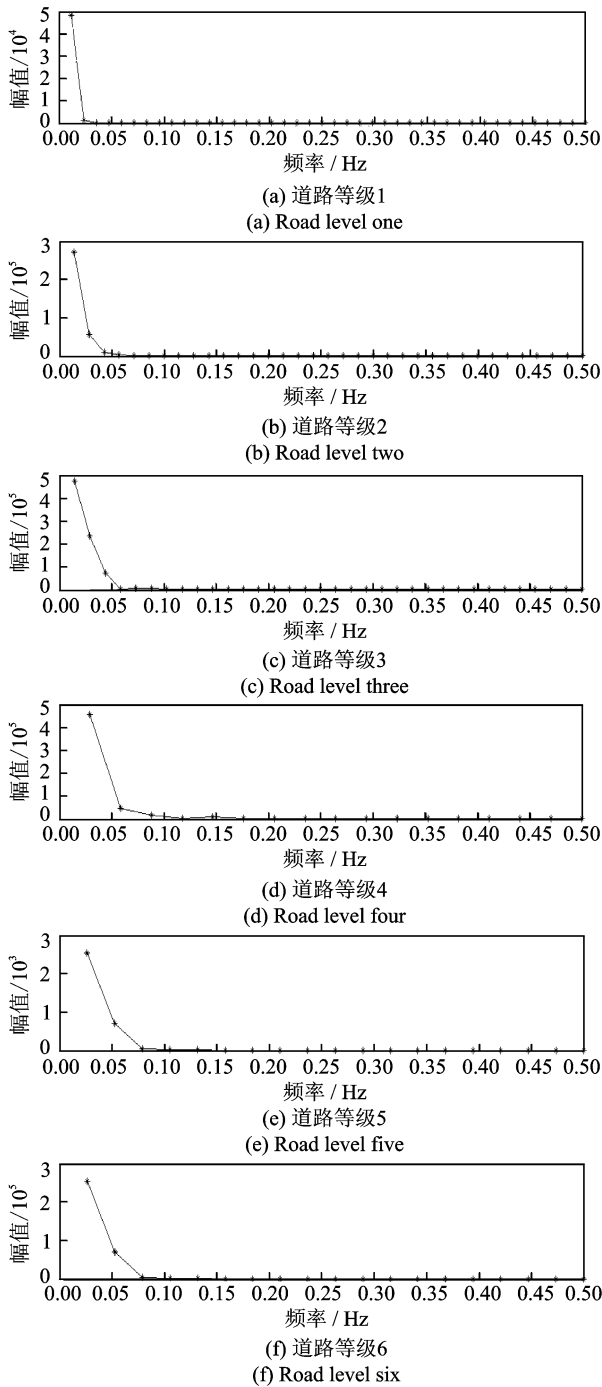


图 5 不同道路上浮动车速度信号的频谱图

Fig. 5 Different spectrum floating car speed signal on the road

根据文献[2]中的方法可以得到 6 条道路对应的路段细化截止频率和采样间隔,如表 1 所示。

表 1 中不同道路的不同截止频率也验证了路网几何特性和拓扑关系对浮动车采样的不同影响,因此在定制采样间隔时需要综合考虑路网的几何

特性和拓扑关系。为了解决该问题,本文通过对路网的几何特性、拓扑关系和道路属性特征的解译和抽象化,按照 1.2 节中方法构建了道路网路二叉树模型,如图 6 所示。

表 1 不同道路上的路段细化截止频率和采样间隔

Table 1 Different sections of road refinement cutoff frequency and sampling interval

道路编码	截止频率/Hz	采样间隔/s
1	0.015	33
2	0.030	17
3	0.050	10
4	0.055	9
5	0.080	6
6	0.120	4

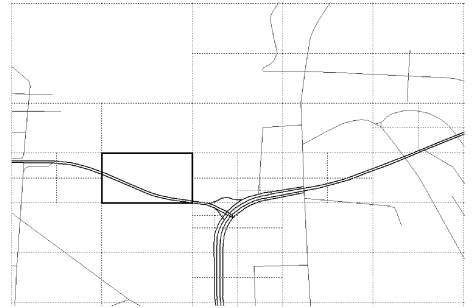


图 6 某市区局部道路网路二叉树模型示意图

Fig. 6 Local urban road network quadtree model schematic

为了验证新算法可以根据道路网络几何特性、拓扑关系、道路属性特征以及浮动车自身速度变化的差异动态优化采样间隔,本文对主观确定法、统计分析法、动态调整法和新算法进行了道路覆盖率<sup>[1]</sup>、地图匹配精度<sup>[10]</sup>、速度均值方差和压缩比的数据统计,数据如表 2 所示。

表 2 浮动车采样算法评价参数

Table 2 Floating car sampling algorithm evaluation parameters

采样算法	道路覆盖率/%	地图匹配精度/%	速度均值方差	压缩比/%	
主观确定法	3 s	99.7	92.8	0.050	33.3
	5 s	97.2	89.2	0.090	19.8
统计分析法	9 s	90.6	85.3	0.130	10.6
	文献[2]	81.6	81.1	0.160	8.7
动态调整法	文献[3]	84.5	86.7	0.080	15.4
	文献[4-5]	85.4	84.2	0.077	15.1
新采样算法	92.4	89.8	0.075	13.2	

## 2.1 道路覆盖率

由表 2 数据可得:新算法的道路覆盖率处于主

观确定法的5~9 s之间,其原因在于新算法在道路交叉路口附近的采样分辨率 $S$ 较小,基本可以完全覆盖路口附近的路段;但在道路路口连接中央路段(如图6加粗方框区域)的采样空间分辨率 $S$ 较大,因此在该部分的两个采样点之间的距离会大于路段划分阈值,即丢失了部分路段上的采样点,其采集的数据点也随即减小。考虑到道路路口连接中央路段通常在交通信息发布时可看作为一整体,因此虽然覆盖率有所降低,但对交通信息描述不会产生过大影响,同时也在一定程度上降低了采样点的数据量,表2中压缩比数据也正确反映这一点。统计分析法中文献[2]采用的算法仅考虑了高速公路(20 s)和城市道路(10 s)两级,对于实验区内基本以城市道路为主,其本质相当于采样间隔为10 s的主观确定法。统计分析法中文献[3]采用的算法是对速度进行了区间划分并设定经验采样间隔,其本质与主观确定法没有实质上的区别。因此新算法的数据统计明显优于统计分析法。动态调整法是根据其实际位置和浮动车速度进行调整采样间隔,但其在速度较快情况下设定的采样间隔较大,会跨越较多的路段,因此其覆盖率劣于新算法。虽然统计分析法和动态调整法考虑到了不同道路的差异和速度差异,但其都未综合考虑浮动车的速度差异、道路属性差异和道路拓扑关系,因此其描述交通信息的数据精度低于本文所提算法。

## 2.2 地图匹配精度

由表2数据可得:新算法在地图匹配精度方面优于大于等于5 s的主观确定法、统计分析法和动态调整法。随着采样间隔的增加,主观确定法所得采样点之间的相关性将大大降低,其匹配精度也随之降低;统计分析法中文献[3]方法是简单采用速度区间划分设定采样间隔经验值,可根据速度快慢调整采样间隔,其采样点之间的相关性有所保持,因此其地图匹配精度相对比较,和新算法基本持平;动态调整法虽然也根据不同区域和速度动态调整,但其采样前的地图匹配误差和经验阈值的影响,使得其对应的地图匹配精度有所降低。而新算法在道路网络复杂区域(如交叉口附近)的采样空间分辨率较小,则采样间隔较小,这样用于地图匹配采样点之间的相关性得到了提高,则匹配精度就相对提高;在道路网络复杂度较低区域(如道路交叉口中间连接段)内的采样点个数较少,虽然采样点之间相关性有所降低,但由于该区域内的预选四

配道路的稀少也在一定程度上扼制了匹配精度的降低。

## 2.3 速度均值方差

速度均值方差反映了采样样本运动趋势与原始运动趋势之间的关系。由表2数据可知:主观确定法随采样间隔的增大,速度均值方差呈递增趋势。如果主观确定法使用较大采样间隔进行交通信息提取,运动趋势的差异将会引入较大的奇异,从而降低描述交通信息的数据精度。统计分析法、动态调整法和新算法都采用了浮动车速度进行确定采样间隔,因此3类算法的速度均值方差基本一致。

## 2.4 压缩比

压缩比是采样点与样本个数之比,反映了采样算法的数据压缩能力。由表2数据可知:新算法优于统计分析法文献[3]和动态调整法;低于 $\geq 9$  s主观确定法和统计分析法文献[2]的性能,但这些采样算法是以降低描述交通信息数据精度为代价的。综合所有指标,新算法在较好保持了描述交通信息数据精度的基础上,也降低了数据容量。

综上所述,新算法可以根据浮动车速度变化、城市道路分布状况和道路属性等信息动态调整采样频率,不仅确保了采样数据的精度,而且降低了数据量。

## 3 结束语

浮动车数据采集技术是目前交通信息获取的重要手段。本文以浮动车历史行驶速度为依据,提出了一种新的面向实际道路网络的浮动车采样间隔优化方法。该方法充分考虑了道路网络的拓扑关系和几何特性,利用四叉树道路网络模型和浮动车预测速度来确定最优采样间隔。通过仿真试验分析可得:新算法能够根据道路网络的几何特性、拓扑关系、道路属性特征以及浮动车自身速度变化动态调整采样间隔,在较好保证采样数据的可靠性基础上降低了采样数据容量,为基于浮动车的交通信息采集技术提供了一种有效的解决方案。由于本文中引入了多个经验阈值,因此下一步的工作将根据浮动车数据的波动性和道路网络的复杂性,结合时空数据模型进行更深层次的研究。

参考文献:

[1] Zhang Wei, Chang Ande, Jiang Guiyan. Sampling

- and transmitting intervals optimization based on GPS equipped floating car [C]//Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Washington,DC,USA:IEEE,2009: 97-100.
- [2] 张存保,杨晓光,严新平. 浮动车采样周期优化方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(3): 100-104.  
Zhang Cunbao, Yang Xiaoguang, Yan Xinping. Method for floating cars sampling cycle optimization [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(3): 100-104.
- [3] Chang Ande, Jiang Guiyan, Niu Shifeng. Reliability degree estimation of traffic information based on floating car [C]//2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control. Shenyang, China: IEEE,2010: 79-82.
- [4] Hong Jun,Zhang Xuedan,Wei Zhongya,et al. Spatial and temporal analysis of probe vehicle-based sampling for real-time traffic information system [C]// Proceeding of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey:IEEE,2007: 1234-1239.
- [5] Fontaine M D, Yakkala A P, Smith B L. Probe sampling strategies for traffic monitoring systems based on wireless location technology [EB/OL]. [http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online\\_reports/pdf/07\\_cr12.pdf](http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/07_cr12.pdf), 2007-01-19/2012-11-01.
- [6] Davis K, Andy A M, Li Y G. Rapid gravity and gravity gradiometry terrain corrections via an adaptive quadtree mesh discretization [J]. Exploration Geophysics, 2011, 42(1) : 88-97.
- [7] 姜桂艳,常安德,张玮. 基于 GPS 浮动车采集交通信息的路段划分方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2010,35(1):42-45.  
Jiang Guiyan, Chang Ande, Zhang Wei. Link deviding method for traffic information collecting based on GPS equipped floating car [J]. Geomatics and Information Sciece of Wuhan University, 2010, 35(1): 42-45.
- [8] 汪永东,马小平. 证据理论合成规则的改进[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(3): 324-329.  
Wang Yongdong, Ma Xiaoping. Improvement on combination rules of evidence theory[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2006, 21(3): 324-329.
- [9] Qing Ye,Wong S C,Szeto W Y. Short-term traffic speed forecasting based on data recorded at irregular intervals [C]//2010 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Madeira Island,Portugal:IEEE,2010:1541-1546.
- [10] Quddus M A,Noland R B,Ochieng W Y. The effects of navigation sensors and spatial road network data quality on the performance of map matching algorithms [J]. Geoinformatica, 2009, 13(1):85-108.
- 作者简介:**曹闻(1979-)男,博士,研究方向:摄影测量与遥感和地理信息系统, E-mail: speechofsilva@126.com;彭焯(1976-)男,博士,研究员,研究方向:信号信息处理。