

## 结合锚点优选算法改进的 SpaceTwist 隐私保护方法

刘振鹏<sup>1,2</sup>, 赵璇<sup>1</sup>, 董亚伟<sup>3</sup>, 张彬<sup>2</sup>

(1. 河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071002; 2. 河北大学信息技术中心, 河北 保定 071002;  
3. 河北大学计算机科学与技术学院, 河北 保定 071002)

**摘 要:** 随着基于位置服务的广泛使用, 用户请求查询过程中真实位置信息泄露会产生严重的安全问题。为此引入 SpaceTwist 增量近邻查询算法, 提出一种结合锚点优选算法改进的 SpaceTwist 位置隐私保护方法。在分布式系统结构下增加了认证服务器, 用户根据自身隐私偏好同时结合实际环境生成  $k$  匿名区, 并且使用锚点优选算法生成锚点; 转发用户使用该锚点进行增量近邻查询并求精。通过在不同的路网环境数据集上实验, 表明该算法具有较好的隐私保护效果, 并且具有较高的工作效率。

**关键词:** 基于位置服务; SpaceTwist 算法;  $k$  匿名; 锚点

中图分类号: TP302

文献标识码: A

## Improved SpaceTwist privacy protection method based on anchor optimization algorithm

LIU Zhen-peng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xuan<sup>1</sup>, DONG Ya-wei<sup>3</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>

(1.School of Computer Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China;  
2. Information Technology Center, Hebei University, Baoding 071002, China;  
3.College of Computer Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** With location-based services worldwide used, private location data appealed easily in query process which caused serious security problems. So the introduction of SpaceTwist incremental nearest neighbor query algorithm, proposes protection of privacy method combined with improved SpaceTwist location optimization algorithm. The anchor point authentication server added to distributed system structure, user generate a  $k$  anonymous area according to their privacy preference and actual environment, using optimization algorithm to generate the anchor point. Forwarding users use the incremental nearest neighbor query through the anchor point and accurate. Experiments in road network environment with different data sets show that the privacy protection works well in the algorithm, and own high work efficiency.

**Key words:** location-based services, SpaceTwist algorithm,  $k$  anonymous, anchor point

### 1 引言

随着移动网络和无线电通信技术的广泛发展和应用, 基于位置的服务 (LBS) 从早期使用于紧急情况下的位置定位<sup>[1]</sup>逐步发展到更多领域。LBS 已经成为移动环境下用户体验的中心环节, 并在移动计算市场中占据核心位置。LBS 查询服务类型众多, 其中, 兴趣点查询 (POI)<sup>[2]</sup>是最为

贴近用户的生活服务, 如查询附近的加油站、饭店、银行等<sup>[3]</sup>。但是这种使用最广泛的查询方式也存在着泄露隐私的巨大风险, 当攻击者截获用户获取位置服务时的查询信息, 从而就可以获得用户的身份数据和位置数据等。这样就会对用户安全形成巨大的潜在威胁。

目前, 对于 LBS 中位置隐私泄露的问题, 陆续提出了诸多解决途径和办法, 其中, 大部分采用位

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家科技支撑基金资助项目 (No.2013BAK07B04)

Foundation Item: The National Science and Technology Support Program Foundation of China (No.2013BAK07B04)

置  $k$  匿名的思想。位置匿名的概念最早是由 Gruteser 等<sup>[4]</sup>提出的。其思想是保证除发起查询的用户外，这个区域中至少包含了其他  $k-1$  个用户，服务端无法从  $k$  个用户中准确识别出真实发起查询的用户，从而大大增加了攻击者的攻击难度。在匿名的思想上，Mokbel<sup>[5]</sup>首次提出了具有中心服务器的隐私保护模型，用户将位置数据发送给第三方服务器，第三方服务器根据其位置构造匿名区并返回用户。同年，Mokbel<sup>[6]</sup>又提出了 Casper 空间匿名模型，利用金字塔数据结构以人群密度为参考将整个空间分割成大小不等的单元，使用单元格实现匿名。Kalnins 等<sup>[7]</sup>、Bamba<sup>[8]</sup>又进行了改进，提出了 Hilbert 曲线填充构造匿名区域。但是中心服务器结构也存在一些问题，主要是容易成为性能瓶颈和集中攻击对象。针对这个问题，Chow 等<sup>[9]</sup>提出了分布式点对点结构，使用空间匿名方法，在发起查询之前用户自行寻找近邻用户组成匿名区，但是这种方法的客户端资源消耗较大。

Yiu 等<sup>[10]</sup>提出了客户端运行的 SpaceTwist 查询算法，该算法基于增量近邻查询 (INN, increasing nearest neighbor) 方法设计，并且摆脱了第三方服务器结构，但是仍不能满足  $k$  匿名的要求，而且锚点随机选取。

## 2 相关概念定义及平面区域分割

### 2.1 相关概念定义

**定义 1** 查询请求  $Q_c$ 。用户  $U_c$  生成查询请求  $Q_c = \{u_{id}, o, r, s, m, con\}$ ，并发送给转发用户  $U_a$ ，其中， $u_{id}$  代表用户身份， $o = (x, y)$  代表  $U_c$  的匿名区中心坐标， $r$  代表匿名区半径， $s$  代表  $U_c$  根据路网环境自适应生成的锚点， $m$  代表用户期望的 POI 个数，POI 表示该单元格内兴趣点数量， $con$  表示  $U_c$  的查询内容。

**定义 2** 转发请求  $Q_a$ 。转发用户  $U_a$  以  $Q_a = \{u_{id}, s, con\}$  的形式向位置服务器发出转发查询请求。其中， $u_{id}$  是转发用户标识符， $s$  和  $con$  代表从  $Q_c$  中解析获得的信息。

**定义 3** 路网粒度  $\lambda$ 。 $G$  为全部区域， $G_i$  是区域  $G$  的一部分，定义  $G_i$  路网粒度为  $\lambda = \frac{S}{l}$ ，其中，

$l$  为  $G_i$  的边界总长度， $S$  为  $G_i$  内所有道路长度和。

### 2.2 平面区域分割模型

SpaceTwist 方法中锚点距离过近或过远会造成查询准确率下降<sup>[11]</sup>，本文优化了锚点的选取方法，对平

面区域进行分割生成空间直方图，在锚点的选取时结合空间直方图。下面是平面区域分割的方法。

1) 位置服务器将平面区域  $G$ ，十字递进形式进行分割<sup>[12]</sup>，直到划分的每个单元格的路网密度不大于给定  $\lambda$ 。

2) 被分割的单元格保存在通信开销较少的四叉树中。其中，四叉树的根节点代表整个平面区域  $G$ ，叶子节点对应不可分割的基本单元格，非叶子节点对应需要继续分割的单元格。

3) 每个节点数据域中存储了对应单元格的信息  $Cell_{info} = \{id, LC, RL, POI\}$  和用户数量  $num$ ，其中， $id$  表示对应的单元格， $LC$  表示该单元格内所有道路的长度， $RL$  表示该单元格的边长， $POI$  表示该单元格内兴趣点数量，并且单元格中的用户数量信息以一定的时间间隔进行更新。

## 3 算法实现

### 3.1 系统模型

本文在分布式结构的基础上添加认证服务器，系统构架主要由移动终端用户、认证服务器和 LBS 服务器构成。如图 1 所示，移动终端具有基本的定位功能，都有唯一的网络标识，且还具有一定的接入网络与信息处理的能力<sup>[13]</sup>，它包含通信/定位模块，匿名模块和查询处理模块。LBS 服务器主要负责接收用户的请求并提供相应的服务，如近邻查询、范围查询等。认证服务器的工作是对需要位置服务的用户进行身份验证。用户在进行点对点通信之前，先在认证服务器进行身份验证，可有效拦截在代理转发过程中的恶意用户。

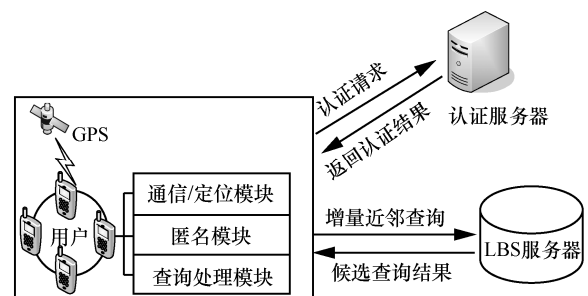


图 1 系统架构

### 3.2 算法具体流程

本文提出的结合锚点优选算法改进的 SpaceTwist 隐私保护方法主要分为 4 步。

1) 初始化。需要位置服务的用户首先通过认

证服务器进行身份验证，然后，自组织成一个分布式网络，然后，查询用户  $U_c$  在 LBS 服务器处获取自己的实际位置  $q$ ，并下载对平面区域  $G$  的分割结果。

2)  $k$  匿名区生成。用户根据地图的平面区域分割确定最小外接圆，使该区域内满足除查询用户至少有  $k-1$  个用户。

3) 锚点优选算法。根据平面区域分割结果中 POI 的分布，估算出最优锚点的位置。

4) SpaceTwist 查询。根据确定的  $k$  匿名区域及锚点形成查询请求  $Q_c$  进行查询。

### 3.2.1 $k$ 匿名区的设计

现有方法针对 SpaceTwist 算法不能实现  $k$  匿名要求进行了改进，但是依然存在  $k$  匿名区域过大或过小等问题。为了解决这个问题，对  $k$  匿名区的设计进一步改进。将用户所在路网粒度与周围单元格的粒度相比较，选取路网粒度相近的进行区域扩展。具体算法步骤如下所示。

1) 查询用户  $U_c$  先向 LBS 服务器请求获取该平面区域的分割结果。

2)  $U_c$  收到区域分割结果后，搜索该四叉树，找到自己位置所在的基本单元格，并以自己所在单元格的外接圆作为匿名区。

3) 查看上述匿名区的用户数，如果不小于  $k$ ，则满足  $k$  匿名要求，以上述匿名区域作为  $k$  匿名区。如果上述匿名区用户数小于  $k$ ，将该单元格中的路网粒度  $\lambda$  与四周单元格中路网粒度进行比较选取差值最小的单元格，然后匿名区确定需要增加的移动对象数，根据所需的移动对象数占选取的单元格的移动对象数的比例，选取单元格的面积直至满足匿名区内用户不小于  $k$ 。

这种方法既满足  $k$  匿名的要求，并且大小适中，保证通信开销可控。

### 3.2.2 锚点优选算法

为了解决查询点与匿名区之间距离问题，利用上述  $k$  匿名区选取时获取的区域分割图基于通信开销自适应产生锚点的优选算法。区域分割图  $G$  包含了空间数据分布查询结果的估计方法<sup>[14-16]</sup>，能为增量近邻查询提供合理的估算依据。使用基于路网的区域分割图  $G$  自适应产生查询点的方法可以有效地控制通信开销。具体的查询点生成算法如算法 1 所示。

1) 初始化需求空间半径  $\lambda$  为  $3r$ ，需求空间估计结果  $\hat{m}$  为 0。

2) 对比需求空间估计结果和用户期望值  $m$

$$\hat{m} \leq m$$

如果满足上述条件，结束估算，该区域则为最小需求空间。如果不满足上述条件更新需求空间估计结果  $\hat{m}$ ，并增加需求空间半径，重复第 3) 步直至满足上述条件，该区域则为最小需求空间。

3) 构造最小需求空间的外接圆  $Q$ 。

4) 圆心即为查询点  $S$  的位置。

算法伪代码如下所示。

#### 算法 1 自适应锚点生成算法

输入 匿名区中心坐标  $o$ ，空间分割图  $G$ ，查询内容  $con$

输出 查询点坐标  $s$

1)  $\gamma \leftarrow 3r$ ; //初始化需求空间半径

2)  $\hat{m} \leftarrow 0$ ; //初始化需求空间估计结果

3) while  $\hat{m} \leq m$

4)  $binset \leftarrow getHist(G, o, \gamma)$ ; //取得覆盖  $\gamma$  的  $G$  子域范围

5)  $\hat{m} \leftarrow Count(binset)$ ; //取得需求空间估计结果

6)  $\gamma \leftarrow \gamma + r$ ; //增加需求空间半径

7) end while

8)  $binset \leftarrow check(binset, 0)$ ; //剔除值为 0 的子域

9)  $Q \leftarrow MBC(binset)$ ; //取的需求空间最小外接圆  $Q$

10)  $s \leftarrow getpoint(Q)$ ; //取得  $Q$  圆心即为查询点

如图 2 所示，阴影区域即为最小需求空间，其外接圆即为供应空间，供应空间的圆心即为锚点  $s$  的位置。

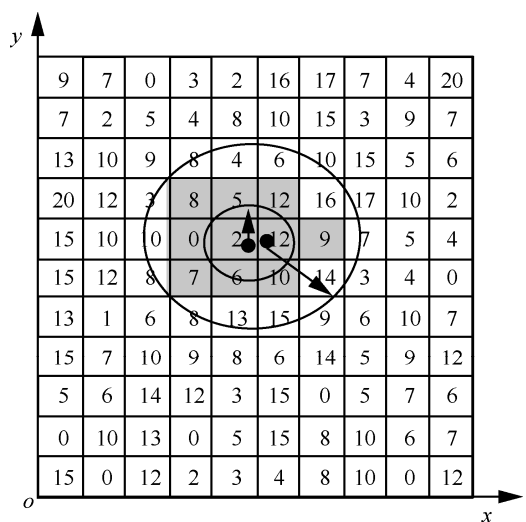


图 2 锚点优选算法

### 3.2.3 SpaceTwist 增量近邻查询算法

本文的查询算法使用 SpaceTwist 算法。查询用户  $U_c$  生成查询请求  $Q_c$  后，通过单跳或多跳路由随机选取转发用户<sup>[17]</sup>，将查询请求发送给转发用户  $U_a$ ；转发用户  $U_a$  解析查询请求  $Q_c$  并生成转发查询请求  $Q_a$ ，发送给 LBS 服务器进行增量近邻查询。具体如算法 2 所示。

#### 算法 2 增量近邻查询算法伪代码

输入 匿名区中心坐标  $o$ ，查询点坐标  $s$ ，查询内容  $con$

输出  $W_k$

- 1)  $W_k \leftarrow \text{Null}$ ;
- 2)  $\gamma \leftarrow \text{Null}$ ;
- 3)  $\tau \leftarrow 0$ ;
- 4) send Msg( $u_{id}, s, con$ )
- 5) while  $\tau + dis(s, o) + r \geq \gamma$
- 6)     for each  $p_i$
- 7)          $W_k \leftarrow p_i$ ;
- 8)          $\gamma \leftarrow dis(s, p_i)$ ;
- 9)         if  $dis(o, p_i) < \tau$  then
- 10)              $\tau > dis(o, p_i)$ ;
- 11)         end if
- 12)     end for
- 13) end while
- 14) return  $W_k$

初始化供应空间半径  $\gamma$  为 0，需求空间半径  $\tau$  为  $\infty$  即整个空间<sup>[18]</sup>，供应空间的圆心为上述锚点  $s$  的位置，需求空间的圆心为匿名区的中心  $o$  的位置。计算  $s$  到  $o$  的距离  $dis(s, o)$ 。

转发用户  $U_a$  将查询信息发送给 LSP 并以增量形式发起多次近邻查询，LSP 将每次的结果返回给  $U_a$ 。 $U_a$  分别计算返回的兴趣点  $p_i$  与供应空间圆心  $s$  和需求空间圆心  $o$  的距离，更新半径  $\gamma$  和  $\tau$ ，计算是否满足

$$dis(p_i, o) + dis(s, o) \geq dis(p_i, s)$$

若满足则供应空间完全覆盖需求空间，查询结束。若不满足则重复上述 POI 查询过程直至满足条件。

### 3.3 算法性能分析

在本文改进的算法中假设转发用户的可信度未知。在转发用户是非可信的情况下，未经认证的恶意用户可以获得查询请求  $Q_c$ ，兴趣点结果集

$\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$  等信息。在不考虑背景知识关联攻击的情况下，恶意用户虽然可以从  $Q_c$  中解析出  $U_c$  的身份标识  $u_{id}$ ，但无法判断出查询用户的身份。此外，假设恶意用户可以截获匿名区的半径  $r$  和圆心  $o$ ，并且可以根据 LBS 服务器返回的结果集  $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$  构造 Voronoi 图<sup>[19]</sup>，Voronoi 图的某个生成元  $V_{(p_i)}$  中一定包含  $U_c$ 。如果匿名区与 Voronoi 图有  $l(l < n)$  个生成元重合，则确定  $U_c$  出现在具体某个生成  $V_{(p_i)}$  中的概率为  $\frac{1}{m}$ ，由此无法判断其准确的位置。所以

本文算法可以在分布式系统结构且转发用户非可信时，保护查询用户的位置和身份不关联。

## 4 实验及分析

### 4.1 实验环境

实验设定分布式网络搭建完成，算法采用 Java，在 Intel 双核 2.6 GHz CPU、4 GB 内存的 Windows 10 平台上运行。实验采用认可度高的 Thomas Brinkhoff 路网数据生成器<sup>[20]</sup>分别在 Oldenburg 城市的交通路网（以下简称 OB）和 San Joaquin 城市的交通路网（以下简称 SJ）上生成移动对象数据，如表 1 所示，并讨论不同路网密度对匿名区的影响。

表 1 2 个实验数据集参数对比

参数	OB	SJ
区域宽度/m	23 572	656 570
区域长度/m	26 915	716 904
路网密度	139.343	17.563
生成移动对象个数	14 070	48 246
生成兴趣点数	703 500	2 412 300

### 4.2 实验结果

#### 4.2.1 算法性能分析

实验在 OB 和 SJ 这 2 个路网密度不同的交通网上进行，由于本算法中匿名区的大小，需求空间的大小，供应空间的大小都与路网粒度算子有关联，所以实验分别比较了在不同路网密度下，路网粒度算子与匿名区面积、需求空间估计值（个）、供应空间估计值（个）的关系。

实验结果如图 3 所示，路网密度与匿名区的面积成反比，SJ 数据集的路网密度小，形成的匿名区面积较大；OB 数据集的路网密度较大，形成的匿名区面积小。在相同路网密度下，路网粒度与匿名

区面积成正比，当路网粒度较小时，路网密度对匿名区影响也较小，反之则较大。

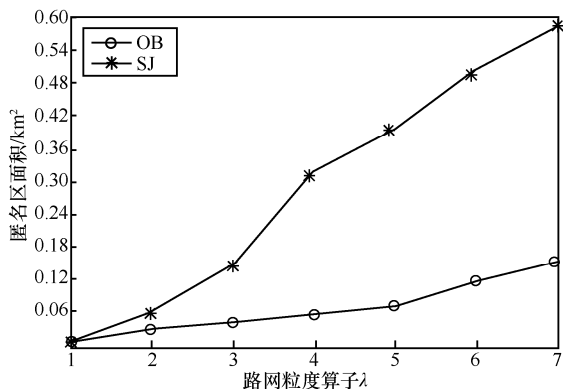


图 3 不同 λ 时的匿名区面积

如图 4 所示，路网密度与需求空间大小成反比。SJ 数据集的路网密度小，而需求空间大，OB 数据集的路网密度较大，而需求空间小。在同一路网密度下，路网粒度与需求空间同样成反比。供应空间如图 5 所示。

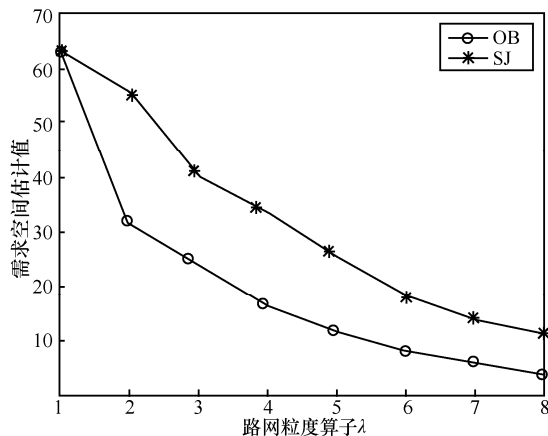


图 4 不同 λ 时的需求空间估计大小

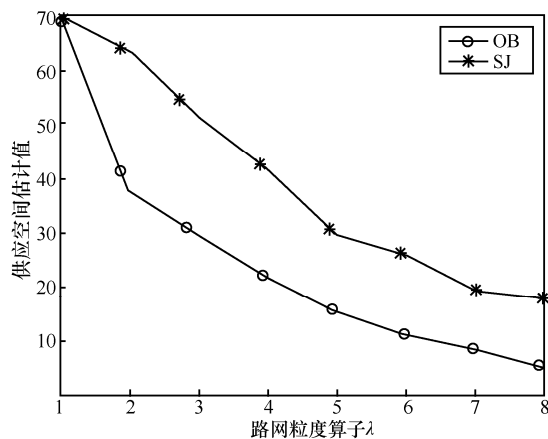


图 5 不同 λ 时的供应空间估计大小

### 4.2.2 算法对比分析

本文算法比 SpaceTwist 算法增加了  $k$  匿名区的构造以及锚点优选，实现了  $k$  匿名保护用户的位置隐私，并且较好地保证了锚点与真实位置的距离。为了检验本算法的有效性，使用相同的数据集进行实验，分别与 SpaceTwist 算法在查询响应时间和准确率进行比较。实验使用 Oldenburg 路网数据集，分别执行 SpaceTwist 算法和本文算法 100 次，结果取均值。SpaceTwist 算法锚点随机选取，用户隐私需求随机生成，范围为  $k \in [5,30]$ 。设置路网密度为 6，锚点与用户距离分别为 100 m、200 m、300 m、400 m、500 m、600 m。实验结果如下所示。

图 6 表示了 SpaceTwist 算法和本文算法在查询响应时间上的差异。可以看出本文在匿名中心与锚点之间距离小于 200 m 的时候，SpaceTwist 算法的响应时间低于本算法，但是随着匿名中心与锚点之间距离的增加，SpaceTwist 算法的响应时间快速增加，由于本算法复杂度和通信开销并不大且基本稳定，所以响应时间基本维持在一定水平，并没有明显增加。实验证明，本算法在响应时间上优于 SpaceTwist 算法。

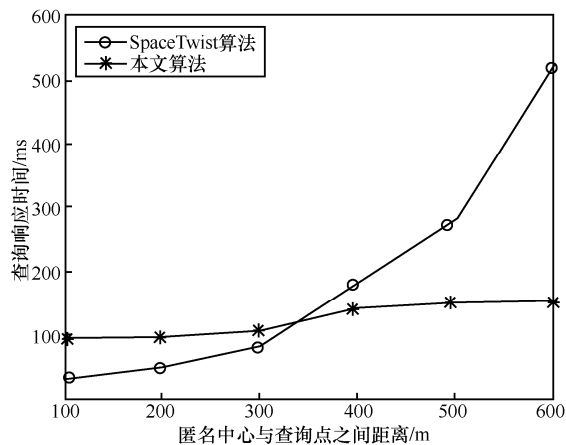


图 6 本文算法与 SpaceTwist 算法的响应时间对比

图 7 表示了 SpaceTwist 算法和本文算法在查询准确率上的差异，根据图 6 可知本文算法在用户人数较少的时候，查询准确率低于 SpaceTwist 算法，这是由于用户数量较少，形成的  $k$  匿名区域较大， $k$  匿名区中心与用户真实位置之间的距离有所增大，导致误差的产生。随着用户数量的增加，查询准确率逐渐上升并稳定在 0.9 左右，最低不低于 0.85，SpaceTwist 算法随着用户数量

的增加准确率也在逐渐上升, 在 4 000 左右达到峰值, 之后开始略有下降。因此, 查询准确率与隐私保护度之间的平衡问题成为今后需要重点研究的课题之一。

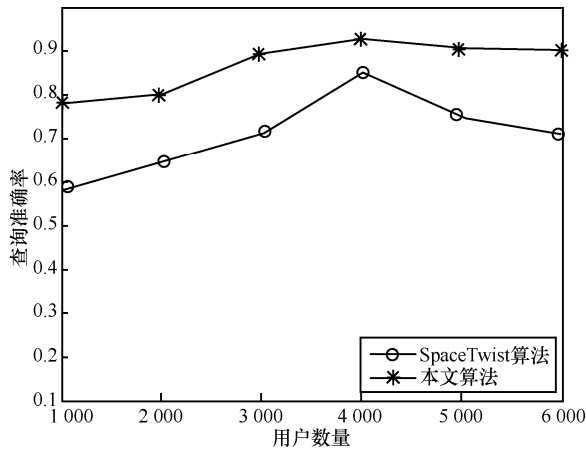


图 7 本文算法与 SpaceTwist 算法的查询准确率对比

## 5 结束语

针对 SpaceTwist 算法只适用于欧式空间, 而且不能实现  $k$  匿名的问题, 提出了一种基于 SpaceTwist 的  $k$  匿名增量近邻查询算法。结合路网环境, 查询用户根据路网分割结果生成  $k$  匿名区, 并基于通信开销生成查询点, 转发用户进行增量近邻查询并求精, 在实现  $k$  匿名的同时完成 LBS 服务, 而且查询准确率大大提高。在不同的数据集上测试了提出的结合锚点优选算法改进的 SpaceTwist 位置隐私保护方法的优点, 并与 SpaceTwist 算法进行比较, 表明本文算法隐私保护性能良好, 准确率较高。

对于基于位置服务中的隐私保护方法仍在不断的研究中, 还有许多问题需要解决, 下一阶段, 将深入研究如何将隐私保护算法更好地运用在连续查询中, 并考虑用户的运动状态。

## 参考文献:

- [1] WU D, WANG X, SUN L, et al. Identity privacy-based reliable routing method in VANETs[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2014, 7(3): 285-294.
- [2] 薛姣, 刘向宇, 杨晓春, 等. 一种面向公路网络的位置隐私保护方法[J]. 计算机学报, 2011, 34(5): 865-878.  
XUE J, LIU X Y, YANG X C, et al. A location privacy preserving approach on road network[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(5): 865-878.
- [3] 潘晓, 郝兴, 孟小峰. 基于位置服务中的连续查询隐私保护研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(1): 121-129.  
PAN X, HAO X, MENG X F. Privacy preserving towards continuous query in location-based services[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(1): 121-129.
- [4] GRUSTER M, GRUNWALD D. Anonymous usage of location-based services through spatial and temporal cloaking[C]//1st International Conference on Mobile Systems, Applications and Services. 2003: 31-42.
- [5] MOKBEL M F. Towards privacy-aware location-based database servers[C]//The 22nd International Conference Data Engineering Workshops. 2006.
- [6] MOKBEL M F, CHOW C Y, AREF W G. The new Casper: query processing for location services without compromising privacy[C]//The 32nd International Conference on Very Large Data Bases. 2006: 763-774.
- [7] GHINITA G, KALNIS P, SKIADOPOULOS S. PRIVE: anonymous location-based queries in distributed mobile systems[C]//The 16th International Conference on World Wide Web. 2007: 371-380.
- [8] BAMBA B, LIU L, PESTI P, et al. Supporting anonymous location queries in mobile environments with privacy grid[C]//The International World Wide Web Conference(WWW'08). 2008: 237-246.
- [9] CHOW C Y, MOKBEL M F, LIU X. A peer-to-peer spatial cloaking algorithm for anonymous location-based service[C]//The 14th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems. 2006: 171-178.
- [10] YIU M L, JENSEN C S, HUANG X G, et al. SpaceTwist: managing the trade-offs among location privacy, query performance, and query accuracy in mobile services[C]//IEEE 24th International Conference on Data Engineering. 2008: 366-375.
- [11] 黄毅, 霍峥, 孟小峰. CoPrivacy: 一种用户协作无匿名区域的位置隐私保护方法[J]. 计算机学报, 2011, 34(10): 1976-1985.  
HANG Y, HUO Z, MENG X F. CoPrivacy: a collaborative location privacy-preserving method without cloaking region[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(10): 1976-1985.
- [12] 毛典辉, 蔡强, 李海生. AgPrivacy: 一种代理服务的 LBS 隐私保护方法[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(11): 1673-1679.  
MAO D H, CAI Q, LI H S. AgPrivacy: a proxy service LBS privacy protection method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(11): 1673-1679.
- [13] 王鹏飞, 李千目, 朱保平. 基于增量近邻查询的位置隐私保护方法[J]. 计算机科学, 2015, 42(3): 158-184.  
WANG P F, LI Q M, ZHU B P. Location privacy protection method based on incremental neighbor query[J]. Computer Science, 2015, 42(3): 158-184.
- [14] 马春光, 周长利, 杨松涛. 基于 Voronoi 图预划分的 LBS 位置隐私

保护方法[J]. 通信学报, 2015, 36(5): 2015109-1-2015109-12.

MA C G, ZHOU C L, YANG S T. Location privacy-preserving method in LBS based on Voronoi division[J]. Journal of Communications, 2015, 36 (5): 2015109-1-2015109-12.

- [15] 肖燕芳. 基于匿名区域变换的位置隐私保护模型与算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

XIAO Y F. Research on location privacy protection model and algorithm based on anonymous scaling[D]. Guangzhou: South China University, 2012.

- [16] 倪巍巍, 陈萧. 保护位置隐私近邻查询中隐私偏好问题研究[J]. 软件学报, 2016, 27(7): 1805-1821.

NI W W, CHEN X. User privacy preference support in location privacy-preserving nearest neighbor query[J]. Journal of Software, 2016, 27(7): 1805-1821.

- [17] 万盛, 李风华, 牛犇, 等. 位置隐私保护技术研究进展[J]. 通信学报, 2016, 37(12): 2016279.

WAN S, LI F H, NIU B, et al. Research progress of location privacy protection [J]. Journal on Communications, 2016, 37(12): 2016279.

- [18] 赵大鹏, 宋光旋, 靳远远, 等. 基于查询概率的位置隐私保护方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(2): 347-351.

ZHAO D P, SONG G X, JIN Y Y, et al. Location privacy protection method based on query probability[J]. Computer Application, 2017, 37(2): 347-351.

- [19] 张磊, 马春光, 杨松涛, 等. 基于轮廓泛化的位置隐私保护模型及方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(12): 2894-2900.

ZHANG L, MA C G, YANG S T, et al. Model and method of location privacy protection based on contour generalization [J]. System Engineering and Electronic Technology, 2016, 38(12): 2894-2900.

- [20] BRINKHOFF T. A framework for generating network-based moving object[J]. GeoInformation, 2002, 6(2): 153-180.

#### 作者简介:



**刘振鹏** (1966-), 男, 河北保定人, 博士, 河北大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为网络信息安全与隐私保护研究。



**赵璇** (1992-), 女, 河北石家庄人, 河北大学硕士生, 主要研究方向为位置隐私保护、网络与信息安全、大数据。



**董亚伟** (1992-), 女, 河北衡水人, 河北大学硕士生, 主要研究方向为数据隐私保护、网络与信息安全、大数据。



**张彬** (1980-), 男, 河北保定人, 河北大学高级实验师, 主要研究方向为计算机网络。