

文章编号:1009-3087(2013)04-0124-07

用户协作模式下自适应情境的 LBS 隐私保护方法

毛典辉,蔡强,李海生,曹健

(北京工商大学 计算机与信息工程学院,北京 100048)

摘要:针对当前 LBS (located-based service)应用中位置隐私保护方法难以实现隐私保护度与服务质量平衡的问题,提出了一种基于用户协作的自适应情境的位置隐私保护方法:移动用户消费 LBS 服务时,需从服务提供商处实时下载“粗糙化”的路网数据,并以此为基础,通过情境感知自主模糊个人真实位置,然后选择具有互助意愿的代理用户进行自适应情境的增量近邻查询。为了提高系统的服务质量,引入通讯成本估算方法确定查询点位置,并采用 Voronoi 图技术过滤代理用户的查询结果,从而减少系统通讯开销。不仅从理论上分析了该方法的隐私保护度与自适应性,而且对方法性能进行了实验与比较,实验结果表明:该方法较 SpaceTwist 算法具有更高的性能优势,实现了隐私保护度与服务质量的平衡。

关键词:基于位置的服务;隐私保护;位置隐私;自适应情境

中图分类号:TP309

文献标志码:A

An Adaptive Context-aware LBS Privacy Protection Method Based on Users Collaboration

MAO Dian-hui, CAI Qiang, LI Hai-sheng, CAO Jian

(School of Computer and Info. Eng., Beijing Technol. and Business Univ., Beijing 100048, China)

Abstract: Most current privacy-preserving located-based service (LBS) techniques have proved to be quivering in the balance with the levels of privacy protection and communication overhead. In order to address these challenges, an adaptive collaborative privacy-preserving technique was introduced in which mobile user firstly achieves his location context based on the downloaded rough topology maps from LBS provider's server while user consume services, then regionalizes his original position and selects a collaborative proxy user for adaptive context-aware incremental nearest-neighbor querying. Meanwhile, in order to improve the QoS (quality-of-service) of system, the query-anchor was determined by communication cost-estimation method and POIs (points of interest) were filtered by on proxy user, which eliminate communication overhead of whole service process. Theoretical analysis and experimental results validated the technique's effectiveness on LBS accuracy, privacy protection and communication QoS compared with SpaceTwist.

Key words: located based service; privacy protection; location privacy; adaptive context-aware

在基于位置的服务(location based service, LBS)应用中,如何有效保护用户的位置隐私成为亟待解决的研究课题^[1]。目前已有的研究成果大都是在可信第三方中心服务器(trusted third party, 简称 TTP)^[2]中应用 k -匿名模型^[3]实现用户位置与查询内容的保护,然而在实际应用中,并没有一个权威机构来评估 TTP 的可信度,故 TTP 并不完全可

信,而且中心服务器容易成为系统性能瓶颈和集中攻击点,因此越来越多的研究趋向无 TTP 结构^[4]。在无 TTP 的隐私保护方法中,根据用户协作与否分为用户协作与非用户协作:后者一般由用户直接发送假位置点至服务提供商进行增量近邻查询,如文献[5]提出的 SpaceTwist 方法,在该模式下,用户身份与查询内容均无法隐藏,容易被攻击者联合其他信息推测出更多用户隐私,因此,无 TTP、用户协作模式成为当前 LBS 隐私保护方法的研究热点。文献[6]通过用户协作提出了基于匿名链的位置隐私保护方法,但该方法主要针对无固定通信基础设施的应用场景,因此不具有广泛应用性;文献[7]在 SpaceTwist 方法基础上通过用户协作构建公共查询

收稿日期:2013-03-18

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(4112016);北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR201108075);北京工商大学青年科研启动基金项目(QNJ2013-13)

作者简介:毛典辉(1979—),男,讲师,博士。研究方向:空间信息服务;云计算。E-mail:maodianhui@gmail.com

点,从而增大了攻击者推测用户身份的难度。但该方法在实际路网环境应用时,要求终端存储完整的路网信息,而终端无法解决海量路网数据实时传输与终端通讯、计算性能有限的矛盾。

针对上述路网应用情境中的用户位置隐私保护问题,提出一种新的位置隐私保护方法:在对服务提供商的大规模路网进行重构处理基础上(重构后的路网数据量远小于原始路网,适合终端实时下载),终端在消费LBS服务时,以此数据为基础,通过情境感知自主模糊个人真实位置,然后通过用户协作模式选择代理用户,由代理用户进行自适应情境的增量近邻查询。该方法不仅切断了服务消费者与服务提供商间的直接关联,而且通过提高算法的自适应性,使得系统在保护位置隐私的同时具有较高的服务质量。

1 隐私保护方法介绍

1.1 相关概念定义

定义1(路网 G) 定义无向图 $G = (V, E)$ 来表示交通公路网络,其中, V 为网络节点集合, E 为网络边集合, W_e 表示边 e 的权重。

定义2(抽象路网 G') 给定图 G 的某一分割方案 $P = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$, 定义图 G 的抽象网络为 $G' = \{V', E', W'\}$, 则 G' 中的每个节点均代表 G 中对应的分割子图, 且边集合 $(i, j) \in E'$ 满足 $\{(i', j') \in E \mid Sub(i') = i \wedge Sub(j') = j\}$ 。

定义3(用户类型) 假定移动用户 $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 通过协作方式完成LBS服务, 当用户 U_c 委托用户 U_p 进行服务查询, 则定义 U_c 为消费用户, U_p 为代理用户。

定义4(增量近邻查询) 假定用户的真实位置点为 o , 查询点为 s , 增量近邻查询过程为服务提供商返回的供应空间包含用户的需求空间为止, 其中供应空间为以 s 为圆心, s 与最后返回结果间的距离为半径的圆形区域, 需求空间为以 o 为中心, o 与用户所需的最近邻结果间的距离为半径的圆形区域。

1.2 隐私保护方法实现思想

用户的位置隐私保护效果与其所处位置情境相关, 当用户处于路网密集区域时, 通常该区域内人流量较大、交叉路口众多, 较小的模糊区域就能保证较好的位置隐私保护效果, 反之, 当用户处于路网稀疏区域, 较大模糊区域才能保证一定的隐私保护效果^[8]。因此, 基于用户协作的自适应情境的隐私保护方法的基本思想为: 假设在实际路网中存在 N 个

具有互助意愿的移动用户, 用户间通过无线通讯协议自组织成通讯网络, 当 U_c 消费服务时, 首先从服务提供商处下载抽象路网 G' , 然后根据查询情境自主设置模糊区域 Q 、查询主题、服务提供商、最大允许时延、返回的 POIs (points of interest) 期望个数等参数形成消费请求; U_c 在协助用户列表中选择具有最大连通稳定度的用户 U_p 代理查询, 发送消费请求至 U_p , 如果在允许时延内收到 U_p 的返回结果, 则根据真实位置计算出最终的查询结果, 否则重新选择 U_p , 重复上述查询过程。对于 U_p 而言, 首先解析接收的消费请求, 然后发送查询主题至服务提供商, 取得 G' 与查询主题空间分布直方图 H ; 再根据 G' 、 H 、 Q 进行通讯成本估算, 确定最优的查询点位置, 再与服务提供商进行增量近邻查询, 并对查询结果采用 Voronoi 图过滤, 返回过滤后的结果集至 U_c , 至此查询结束。

2 隐私保护方法实现

该隐私保护方法实现系统分为移动终端与服务提供商, 具体结构如图1所示, 其中移动终端系统功能包含网络组建与通讯、代理用户选择以及增量近邻查询; 服务提供商系统功能包含路网重构与增量查询服务。由于移动用户间的网络组建与通讯涉及网络通讯协议、移动节点加入、退出与重定位、系统负载均衡等问题^[9], 因篇幅所限, 在此不予叙述, 相关实现可参考文献[10]。重点介绍服务提供商的路网重构以及终端自适应情境的LBS服务实现。

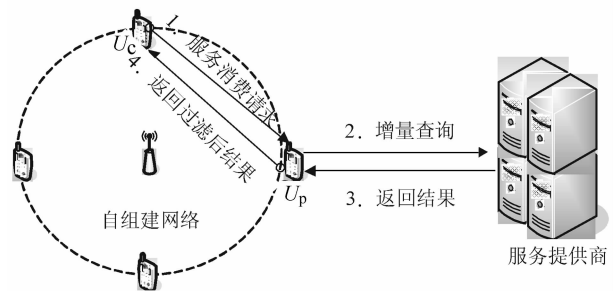


图1 LBS隐私保护系统结构图

Fig.1 Privacy-preserving LBS system architecture diagram

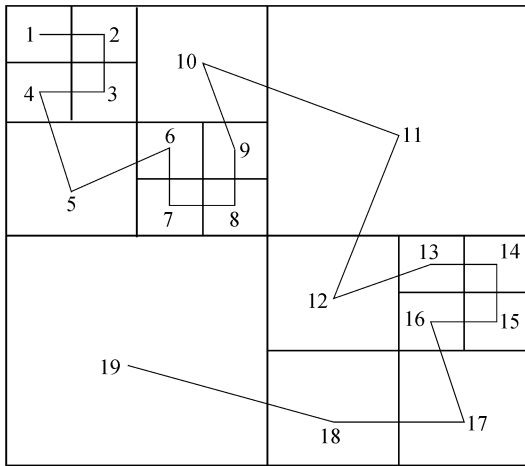
2.1 服务提供商端路网重构实现

移动终端因性能局限无法实时下载完整路网拓扑信息, 而用户服务消费过程中的情境感知是以全局路网信息为基础, 为了解决此矛盾, 在服务提供商端对大比例尺的路网拓扑结构进行“粗糙化”处理, 从而使得重构后的抽象路网满足终端的实时通讯开销。由于实际路网拓扑结构呈现非均匀性, 为了保

证重构前后路网拓扑结构具有一致的情境上下文信息,引入路网粒度算子实现路网的非均匀划分。

定义 5(路网粒度算子 λ) 设 G_i 为路网 G 的任意一个子空间区域, s 为 G_i 的周长, l 为 G_i 内道路总长度,则定义 $\lambda = l/s$ 为 G 的路网粒度算子。

抽象路网重构算法实现流程为:设置某一路网粒度算子 λ 值,依据空间层次分解方法,将 2 维的路网空间 G 均分为 4 个子空间 C_0, C_1, C_2, C_3 ,如果 $C_i (i \in [0, 3])$ 内路网粒度 $\lambda_i > \lambda$, 则对 C_i 继续迭代划分,直到 $\lambda_i \leq \lambda$ 为止。对于划分后的子空间集合,选择区域 C_i 的中心 P_i 作为该区域的投影点,连接所有投影点形成完整的 Hilbert 遍历曲线^[11] (如图 2(a) 所示)。为了表征抽象路网各节点间的邻近性与连通性,在投影过程中,需对相邻子空间进行区域连通性判断,形成区域连通矩阵(如图 2(b) 所示),矩阵中“1”表示相邻区域存在路网交点,“0”表示相邻区域无路网交点,抽象路网重构过程的实现如算法 1 所示。



(a) 路网划分

区域	C_1	C_2	C_3	\dots	C_n
C_1	1	1	1	\dots	1
C_2		1	1	\dots	0
C_3			1	\dots	0
\dots				1	0
C_n					1

(b) 区域连通矩阵

图 2 路网粗糙化处理示意图

Fig. 2 Road-network roughened diagram

算法 1 抽象路网重构算法

输入: C 作为原始路网数据文件;

输出: $\text{BuildTree}(C)$ 作为粗糙化的路网文件。

1. Function $\text{BuildTree}(C)$
2. $\lambda^* \leftarrow$ 设定路网粒度算子值
3. if $\text{length}(C) > \lambda^* \text{Area}(C)$ then
//判断区域内路网粒度值是否大于设定值
4. $c_1, c_2, c_3, c_4 \leftarrow \text{Partition}(C)$
//将该区域均分为 4 份
5. for $i = 1, 2, 3, 4$ do
6. return $0 \mid \text{BuildTree}(C_i)$
//迭代判断每个区间的路网粒度值
7. end for
8. end if
9. for $\text{BUILDTREE}(C)$ do
10. if $\text{Cross}(C_i, C_j) = \text{true}$ then
//判断相邻区域内是否存在交叉点
11. $\text{Matrix}(C_i, C_j) = 1$ //连通矩阵值为 1
12. else
13. $\text{Matrix}(C_i, C_j) = 0$ //连通矩阵值为 0
14. end if
15. end for
16. end Function

2.2 消费用户端自适应情境的服务实现

具有互助意愿的移动用户通过无线通讯协议自建通讯网络,当用户 U_c 消费服务时,服务实现流程为:

1) 终端通过定位功能取得用户真实位置点,并检查是否已存储查询主题所需的路网拓扑结构,如果没有,则从服务提供商处实时下载抽象路网;

2) 以抽象路网数据为基础,用户进行位置情境感知,取得用户的位置上下文信息,并自主设置模糊区域、查询内容、服务提供商、最大允许时延与返回的 POIs 期望个数等参数,形成消费请求;

3) 在协作用户列表中选择最大连通稳定度的用户 U_p 进行查询代理,发送消费请求至 U_p ,其中代理用户的选择算法可参考文献[6];

4) 如果在允许时延范围内收到 U_p 返回结果, U_c 从服务提供商处下载过滤结果对应的路网详细信息,并根据自身位置计算出最终结果,否则重复步骤 3),直至查询成功为止。

2.3 代理用户端自适应情境的服务实现

代理用户协助消费用户完成服务过程中,承担着 3 个主要任务:确定查询点位置、增量近邻查询处

理、查询结果过滤。其通讯开销由查询过程中返回的路网拓扑结构与 POIs 组成,并且受查询点的位置选取影响,因此,为了降低服务过程中的通讯开销,在代理用户端引入自适应情境的通讯成本估算方法,从而确定查询点位置。

1) 自适应情境的查询点优选算法

自适应情境的查询点确定算法实现流程为: U_p 首先解析收到的消费请求,然后发送查询主题(如医院、餐厅等)至服务提供商;服务提供商依据抽象路网 G' 统计每个节点区域内 POIs 数量,形成空间直方图 $H^{[12]}$,返回 G', H 至 U_p ; U_p 依据 G', H 进行通讯成本估算,判断区域 Q' (如图3中灰色区域)内 POIs 值是否满足 U_c 期望,否则扩大 Q' 范围直至满足条件为止,此时 Q' 即为最小通讯成本估计的需求空间,包含 Q' 的最小外接圆 Q'' 即为最小通讯成本估计的供应空间, Q'' 圆心 s 即为最小通讯成本估计的查询点位置,查询点的选择实现如算法2所示。

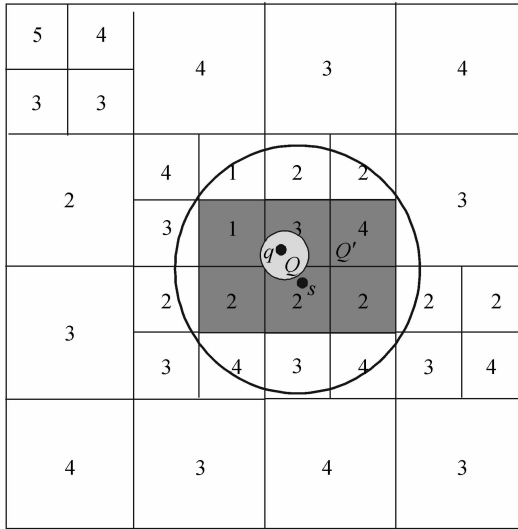


图3 查询点估算算法示意图

Fig.3 Anchor estimated algorithm diagram
算法2 自适应情境的查询点确定算法

输入:消费用户代理请求;
输出:查询点 s 位置。

1. $o, r \leftarrow$ 取得模糊区域 Q 中心点坐标以及半径
2. $con \leftarrow$ 取得消费用户查询主题
3. $Serv \leftarrow$ 取得服务提供商地址
4. $m \leftarrow$ 取得 POIs 期望值
5. $SendMsg(Serv, con)$
//发送查询内容 con 至 $Serv$
6. $H \leftarrow$ 服务提供商返回查询主题空间直方图
7. $G' \leftarrow$ 服务提供商返回抽象路网
8. $\gamma \leftarrow 3r$ //初始化需求空间半径

9. $\hat{m} \leftarrow 0$ //初始化需求空间估计结果
10. While $\hat{m} <= m$
11. $binset \leftarrow getHist(G', H, o, \gamma)$
//需求空间估计
12. $\hat{m} \leftarrow Count(binset)$
//取得需求空间内统计结果
13. $\gamma \leftarrow \gamma + r$ //增加需求空间半径
14. end While
15. $Q'' \leftarrow MBC(binset)$ //取得估计的供应空间
16. $s \leftarrow getpoint(Q'')$ //取得查询点坐标

2) 增量近邻查询与结果过滤

代理用户发送查询点至服务提供商进行增量近邻查询,该查询过程具体实现可参考文献[5]。为了减少代理用户与消费用户间的通讯开销,引入 Voronoi 图实现查询结果过滤,具体实现过程如算法3所示,其实现流程为:①代理用户以查询结果集为基础生成 Voronoi 图;②遍历 Voronoi 格,判断该区域与消费用户设置的模糊区域间的空间关系,二者如果满足包含或相交关系,则将该 Voronoi 格对应的生成点插入过滤集中;③发送过滤后的结果集至消费用户,算法终止。

算法3 基于 Voronoi 图的结果过滤算法

输入:增量近邻查询结果集;
输出:过滤后的结果集。

1. $w \leftarrow$ 输入增量近邻查询结果集
2. $result \leftarrow \emptyset$ //初始化过滤后结果集合为空
3. $V = VoronoiGen(w)$ //生成 Voronoi 图
4. $edgesList = v.getedges()$ //遍历 Voronoi 格
5. for each e in $edgesList$
6. $D = Distance(e, Q)$
//计算 Voronoi 格与模糊区域间距离
7. if $D \leq 0$ //判断 Voronoi 格与模糊区域间关系
8. $w_i = e.getpoint()$
//取得 Voronoi 格生成点
9. $result = insert(w_i)$
//将生成点插入过滤结果集合
10. end if
11. end for
12. $SendMsg(U_c, result)$ //发送过滤结果至 U_c

3 隐私保护方法性能分析

3.1 隐私保护度分析

终端在服务消费过程中,其位置信息存在2种途径被攻击者截取:①攻击者在服务提供商端截取

查询请求以及返回结果;②攻击者伪装成代理用户窃消费请求进而推测出消费用户隐私信息,下面分别分析这 2 种情况:

1) 攻击者在服务提供商端截取信息

假设攻击者在服务提供商处截取查询请求与查询结果,攻击者则可获取用户的查询点与查询主题等信息。对于代理用户而言,该信息与其隐私无关,故代理用户不存在隐私泄露;对于消费用户而言,攻击者无法与其直接关联,因此用户身份信息以及查询主题均得到保护;而对于位置隐私,假设攻击者已知查询点 s 以及 POIs 有序结果集 $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$, 根据增量查询结束条件^[5]可知,查询结果集满足如下方程:

$$\begin{cases} \text{dist}(Q, s) + \min_{1 \leq i \leq (m-1)}^k \text{dist}(Q, p_i) > \text{dist}(s, p_{m-1}), \\ \text{dist}(Q, s) + \min_{1 \leq i \leq m}^k \text{dist}(Q, p_i) \leq \text{dist}(s, p_m). \end{cases}$$

上述表达式中 k 为消费用户期望的 POI 值在查询集合中顺序,攻击者无法确定具体 k 值,故该方程存在多个解,每个解均表示消费用户的一个隐私区域,因此,消费用户位置隐私也得到保护。

2) 攻击者伪装为代理用户服务

当攻击者伪装成代理用户截取代理请求数据包时,可获取用户的查询主题以及模糊区域,在无其他背景知识辅助下,攻击者无法获取消费用户身份信息,故用户的查询隐私没有泄露;另外,由于消费用户根据位置情境设置了模糊区域,攻击者很难定位消费用户的真实位置,因此用户的位置隐私也得到了保护。

3.2 服务质量分析

本 LBS 隐私保护方法的服务质量取决于自组网络的稳定性以及系统通讯开销,针对用户自组网络的稳定性分析,因篇幅所限,在此不予叙述,具体详见文献[9];另外,系统的通讯开销由消费用户与服务提供商间通讯、代理用户与服务提供商间通讯、消费用户与代理用户间通讯组成,对于消费用户而言,模糊区域由用户根据位置情境上下文信息设置,因此,用户的隐私保护效果在其风险承受能力范围之内,因此具有较高的安全性。对于代理用户而言,通过查询结果的空间分布直方图估算查询点位置,避免了查询点随机选取导致通讯开销不可控的通讯问题;而且采用 Voronoi 图过滤查询结果,减少了用户间的冗余通讯,因此,系统整体通讯开销能自适应用户的隐私保护度设置,保证了 2 者的平衡。

4 实验以及结果分析

4.1 实验环境

实验平台选用业界认可的 Thomas Brinkhoff 路网数据生成器^[13],系统分别模拟用户的服务消费以及服务提供商的服务查询,城市交通路网为 Oldenburg 路网地图(区域面积为 $23.57 \text{ km} \times 26.92 \text{ km}$)。模拟平台随机生成 1 000 个用户以及 1 000 个 POIs,本文算法采用 Java 语言实现,实验机器配置为四核 Intel 2.70 GHz CPU、8 GB 内存。

4.2 实验结果分析

1) 路网粗糙化处理分析

为了分析路网粒度算子 λ 对移动终端存储以及通讯开销的影响,实验中对 Oldenburg 城市路网分别设置不同的 λ 值进行粗糙化处理,选取粗糙化率 M 作为路网重构前后评价指标($M = \text{原始路网文件大小} / \text{重构后路网文件大小}$),比较结果如图 4 所示。

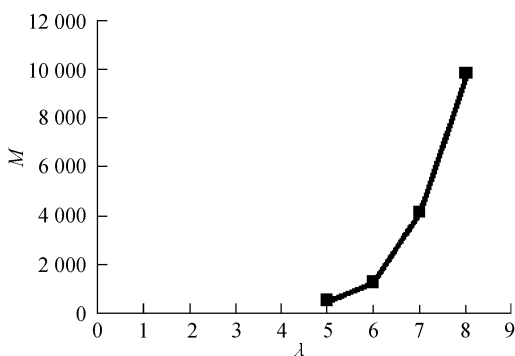


图 4 粗糙化率与 λ 关系示意图

Fig. 4 Relation between roughness ratio and λ

从图 4 可知:原始路网空间的粗糙化率与路网粒度算子 λ 取值正相关,这意味着, λ 越大,则原始路网空间划分的子空间个数越少,重构后的抽象路网各节点粒度越粗,故具有较高的数据压缩比,因此,服务提供商可根据移动终端的性能差异提供多种粒度的抽象路网数据供终端下载。

2) 算法性能分析

为了评估隐私保护算法的性能,在模拟平台中分别设置不同的路网粒度算子 λ 值以及消费用户的隐私区域半径 r (单位:m),统计不同取值下代理用户的通讯开销与计算效率,实验选取的评价指标为:POIs 空间分布直方图 H (单位:kB),需求空间估计值 Dct (单位:个)、供应空间估计值 Sct (单位:个)、过滤后结果集 Rct (单位:个),实验统计结果如表 1 所示。

表1 代理用户通讯开销统计

Tab.1 Proxy user communication cost statistics

λ	r/m	H/kB	$Dct/\text{个}$	$Sct/\text{个}$	$Rct/\text{个}$
4	100	2.35	16.81	111.61	4.37
4	500	2.35	44.95	269.64	13.63
4	1 000	2.35	76.03	479.69	38.49
6	100	0.97	8.98	60.57	4.61
6	500	0.97	28.65	175.57	13.59
6	1000	0.97	69.36	391.48	34.85
8	100	0.13	4.07	23.68	3.95
8	500	0.13	20.59	129.44	12.87
8	1 000	0.13	53.58	322.46	37.51

3)算法对比分析

为了评价隐私保护算法对查询情境的自适应性,实验中选取随机选择查询点的SpaceTwist算法进行性能比较,实验参数为:消费用户设置的模糊区域半径 r 为100、500、1 000 m,路网粒度算子 λ 取值为7,随机选取的查询点与模糊区域距离 l 为0、100、250、500、1 000 m。评价指标为:供应空间 Sct (单位:个)、需求空间 Dct (单位:个)、服务提供商查询时间 Qt (单位:ms)、终端计算时间 Pt (单位:ms)。

实验中每组参数设置均运行100次,统计评价指标的平均值,比较结果如表2、3所示。

表2 SpaceTwist算法统计结果

Tab.2 SpaceTwist algorithm statistics result

r/m	l/m	$Sct/\text{个}$	$Dct/\text{个}$	Qt/ms	Pt/ms
100	0	12	6	23.20	0.23
100	50	17	6	22.68	0.42
100	100	25	6	22.72	0.39
100	250	32	6	24.43	0.59
100	500	53	6	23.12	1.21
100	1 000	95	6	25.42	2.24
500	0	175	68	27.05	4.98
500	50	192	64	26.84	4.54
500	100	212	72	28.35	5.65
500	250	246	74	28.50	6.87
500	500	274	77	27.57	5.70
500	1 000	358	71	32.14	9.09
1 000	0	683	248	40.06	18.22
1 000	50	678	252	39.32	17.40
1 000	100	698	263	40.68	18.32
1 000	250	719	234	40.30	20.00
1 000	500	765	239	44.88	21.04
1 000	1 000	921	241	49.91	25.57

表3 自适应情境算法统计结果

Tab.3 Adaptive context-aware algorithm statistics result

r/m	$Sct/\text{个}$	$Dct/\text{个}$	Qt/ms	Pt/ms
100	33	6	25.23	25.79
500	178	70	27.65	30.08
1 000	392	242	39.30	39.89

5 结论

现行的位置隐私保护方法在实际路网应用中存在诸多不足,主要受系统体系结构以及终端性能局限,因此,提出了一种自适应情境的位置隐私保护方法,与其他位置隐私保护方法相比,本文方法解决了终端位置情境感知过程中海量路网数据实时下载与终端计算、通讯性能不足的矛盾,同时,自适应情境的LBS服务消费算法在保护用户位置隐私的同时,有效降低了系统通讯开销,保证了隐私保护度与通讯开销的平衡,但由于消费用户的隐私保护意识容易因身份、环境、应用不同而改变,具有较强主观性、个性化,因此如何根据查询情境,提高隐私保护方法在消费用户端的自适应性将是下一步研究重点。

参考文献:

[1] Shin K G, Ju Xiaoen, Chen Zhigang, et al. Privacy protection for users of location-based services[J]. Wireless Communications, 2012, 19(1): 30 - 39.

[2] Zhou Aoying, Yang Bin, Jin Cheqing, etc. Location-based services: Architecture and progress[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(7): 1155 - 1171. [周傲英, 杨彬, 金澈清, 等. 基于位置的服务: 架构与进展[J]. 计算机学报, 2011, 34(7): 1155 - 1171.]

[3] Gedik B, Liu L. Location privacy in mobile systems: A personalized anonymization model [C]//Proceedings of the 25th International Conference on Distributed Computing Systems. Columbus, IEEE, 2005: 620 - 629.

[4] Pavel S, Frank D, Kurt R. Map-aware position sharing for location privacy in non-trusted systems [C]//Proceedings of the 10th International Conference Pervasive Computing. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 388 - 405.

[5] Yiu M L, Jenson C S, Moller J, et al. Design and analysis of a ranking approach to private location-based services[J].

- ACM Transactions on Database Systems, 2011, 36(2): 1 - 42.
- [6] Xu Jian, Huang Xiaoxi, Guo Ming, et al. Location privacy through an anonymous chain in dynamic P2P network[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(4): 712 - 718. [徐建, 黄孝喜, 郭鸣, 等. 动态 P2P 网络中基于匿名链的位置隐私保护[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(4): 712 - 718.]
- [7] Huang Yi, Huo Zheng, Meng Xiaofeng. CoPrivacy: A collaborative location privacy preserving method without cloaking region[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(10): 1975 - 1985. [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): 1975 - 1985.]
- [8] Lin Xin, Zhou Lingchen, Chen Peng. Privacy preserving reverse nearest neighbor queries processing on road network [J]. Computer Science, 2012, 7419: 19 - 28.
- [9] Chow C, Mokel M F, Liu X. A peer to peer spatial cloaking algorithm for anonymous location based service [C]//Proceedings of 14th ACM International Symposium on Geographic Information Systems. Arlington, 2006: 171 - 178.
- [10] Mao Dianhui, Cai Qiang, Li Haisheng, et al. LBS privacy protective method based on collaborative proxy incremental query [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(3): 73 - 77. [毛典辉, 蔡强, 李海生, 等. 协作代理增量查询的 LBS 隐私保护方法. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 73 - 77.]
- [11] Aniket Pingley, Wei Yu, Nan Zhang, et al. A context-aware scheme for privacy preserving location-based services [J]. Computer Networks, 2012, 56(11): 2551 - 2568.
- [12] Acharya S, Poosala V, Ramas S. Selectivity estimation in spatial databases [J]. Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD), 1999, 28(2): 13 - 24.
- [13] Brinkhoff T. A framework for generating network based moving objects [J]. GeoInformatica, 2000, 6(2): 153 - 180.

(编辑 杨 蓓)