

## 基于拍卖的物联网搜索数据提供机制

殷丽华<sup>1</sup>, 郭云川<sup>1</sup>, 张会兵<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 信息工程研究所, 100093; 2. 桂林电子科技大学 广西可信软件重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 不同于互联网搜索采用爬虫等技术来采集数据, 物联网搜索获取数据的主要方式之一是数据拥有者主动提供数据, 然而自私性及隐私保护等原因导致数据拥有者不愿主动提供数据。这使得如何有效激励数据拥有者提供数据成为促进物联网搜索发展的关键问题之一。由于竞价拍卖能有效激励参与合作, 因此将竞价博弈引入到物联网搜索中, 为物联网搜索中的数据收集提供方法。具体地, 提出了面向性价比最优的多属性逆向拍卖激励机制, 证明了最优数据质量独立于自身报价、其他竞拍者的数据质量及其报价。

**关键词:** 物联网搜索; 数据采集; 博弈

中图分类号: TP309.2

文献标识码: A

## Data provision for IoT searches: an auction approach

YIN Li-hua<sup>1</sup>, GUO Yun-chuan<sup>1</sup>, ZHANG Hui-bing<sup>2</sup>

(1. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

2. Guangxi Key Lab of Trusted Software, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Getting accurate data was one of keys problems in the IoTs search. Different from the Web searches that use the crawlers to collect data on the Internet, the IoT searches require that owners offer data proactively because their data were not simply released to the Internet. However, due to some reasons(privacy concerns), data owners were unwilling to provide their data to the IoT searches without enough incentives. As a result, effectively motivating owners to provided data becomes a key problem for he development of IoT searches. To address this problem, a multi-attribute auction that maximizes cost-effectiveness ratio was proposed. This mechanism can prevent hostile bids and avoid the problem that the winner provide data inconsistent with the promised quality. It was also proved that in the auction, the optimal quality was independent from its quotation and other bidders' quality and their price.

**Key words:** IoT search; data provision; game

### 1 引言

2013 年 5 月工业和信息化部发布的《物联网标识白皮书》表明, 未来我国的物联网终端数量将达到 100 亿~1 000 亿, 均每平方千米土地上将部署多达 1 000~10 000 个物联网终端。面对由如此庞大的终端、海量实时的数据组成的物联网, 物联网搜索

为快速准确地发现用户所需要的服务提供了核心途径。作为一种基础服务, 物联网搜索在医疗、教育、环境等方面都有广泛的应用<sup>[1]</sup>。物联网搜索的研究最早可追溯到 2004 年, 研究者在美国国家自然科学基金委持续资助下研发了 Dyser 系统<sup>[2]</sup>。该系统将物理实体和传感器抽象为 Web 页面, 而后利用 Web 搜索技术实现对物体的搜索。继 Dyser 系统

收稿日期: 2015-05-30; 修回日期: 2015-10-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013AA014002); 中国科学院战略先导专项基金资助项目(XDA06030200); 广西省自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118365, 2014GXNSFDA118036); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划基金资助项目; 桂林电子科技大学创新团队基金资助项目

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program) (2013AA014002); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA06030200); The Natural Science Foundation of Guangxi Province (2014GXNSFAA118365, 2014GXNSFDA118036); The High Level of Innovation Team of Colleges and Universities in Guangxi and Outstanding Scholars Program Funding; The Program for Innovative Research Team of Guilin University of Electronic Technology

之后, 各国政府及相关部门观察到了物联网搜索的战略价值, 纷纷启动物联网搜索相关项目, 如 2011 年欧盟启动了对物理世界信息进行检索的 SMART 项目<sup>[3]</sup>; 2015 年 3 月, 中国国家自然科学基金委发布了《大搜索技术白皮书》<sup>[1]</sup>。与此同时, 研究者针对与物联网密切相关的设备搜索展开了大量的研究, 开发了相应的搜索系统。如 DoCoMo 欧洲通信实验室开发了 OCH (objects calling home)<sup>[4]</sup>, 阿尔卡特—朗讯—贝尔实验室联合开发的基于本体搜索的 Phony 系统<sup>[5]</sup>, 澳大利亚 Commonwealth 科学与工业研究组研发的分布式传感器节点搜索系统<sup>[6]</sup>, 威廉与玛丽学院研制了面向普适计算的嵌入式设备搜索引擎 (Snoogle) 来实现传感器数据库中的信息检索<sup>[7]</sup>等。

虽然上述系统能有效地为同一机构或组织提供物体或设备搜索, 但其隐式假设为物体自动向搜索中心传递与其自身状态相关的数据、或积极接受搜索中心的数据查询。这种假设适用于机构内部的物体和设备搜索, 不适用于外部具有利益冲突的搜索者搜索。因为物联网中的数据归属于不同机构、组织或个人, 具有明显的“所有权”和隐私保护需求, 虽然少部分所有者乐意向物联网搜索中心公开其数据, 但多数所有者具有明显的自私性特征, 在未得到足够经济等激励的情况下, 不会公开其生产或采集的数据给搜索引擎中心。如多数手机用户不会无偿地为物联网搜索引擎中心提供其所在地的环境信息 (如温度、湿度、噪音量等)。然而, 缺乏实际数据支持的物联网搜索难以产生实际作用, 因此需要设计激励机制来鼓励数据拥有者为物联网搜索中心提供数据。

针对上述问题, 本文提出了性价比最优条件下基于多属性逆向竞价拍卖的数据提供机制: 将数据看成有价值的商品, 数据提供者依据数据的成本进行要价, 不同质量的数据对搜索中心的价值不同, 搜索中心依据最优性价比选定最终的数据提供者。由于竞价拍卖中获胜者的每次数据提供均能获得满足其要价 (高于其成本) 的收益, 因此, 能够有效地激励数据提供者提供数据。给出了对于数据提供者最优投标生成方法, 证明了在该方法中最优数据质量独立于自身报价、其他竞拍者的数据质量与报价; 针对数据提供者不可信问题, 证明了所提出的拍卖机制能防止恶意竞价及不按预定数据质量提供服务。

## 2 相关工作

物联网数据提供机制主要包括两类: 被动采集和主动提供。其中, 被动采集是指物联网所有者发布相关数据并等待物联网搜索中心抓取数据<sup>[2,5]</sup>或直接在物联网节点终端接收来自物联网搜索中心的查询<sup>[6,8-10]</sup>。抓取方式的主要实现手段是将实体及其产生的数据封装为 Web 页面, 并在 Web 上发布, 而后采用互联网搜索中的爬虫机制获取相关数据, 数据最终存储在物联网搜索中心。在物联网终端接受查询的方式是在终端设计相应的查询协议、开发相应的查询接口, 而后为合法用户提供相应的查询, 这种方式中大部分数据仍然以本地方式存储在物联网终端。

主动提供数据是指物联网网络所有者积极主动实时地向物联网搜索中心上传相关数据<sup>[3]</sup>。然而, 这 2 种方式都需要物联网网络所有者的主动合作, 所有者的自私性等特征导致在实际中少有成功。因此需要一种具有激励特征的数据提供机制。据我们所知, 目前还没有工作针对物联网搜索的数据提供激励机制, 因此, 下面主要聚焦于与物联网搜索具有类似特征的面向传感器/移动网络激励机制的研究现状。

目前, 激励节点参与合作方法主要包括 2 类: 基于价格的激励策略<sup>[11-15]</sup>和基于信誉的激励策略<sup>[16]</sup>。基于价格激励的基本思想是将节点合作看成一种服务, 合作者可通过拍卖等方式获得现金 (包括虚拟现金等) 从而激励节点合作。如文献[12]将编码包看做虚拟电子货币来激励节点合作, 降低通信开销, 文献[14]设计了针对机会网络的概率转发算法来大规模传播电子购物券, 类似地, 文献[4]面向移动在线社交网络提出了基于自我兴趣驱动的电子广告传播算法。在基于信誉的激励机制方式中, 节点通过合作等方式获得其他节点在系统中的可信度评价。一个节点信誉越高, 其他节点越可能与其合作完成该节点的相关任务<sup>[16]</sup>。文献[15]提出了一种合作认证静态博弈模型以帮助节点决定是否参与合作认证。文献[17]综述了采用博弈论方法研究网络安全和隐私问题的研究进展。

与本文最相关的工作如文献[18~22]所示, 其中, 文献[18,19]分别基于完全信息和不完全信息研究了面向智能手机的数据众筹方法; 文献[20,21]给出了分布式云计算环境下的数据拍卖激励机制; 特

别地，文献[22]研究多属性的逆向拍卖机制。这些工作以效益最大为目标，由于某些约束（如资本受限等），搜索中心可能会以性价比最大化为目标；同时，在物联网搜索中不可能对所有的数据提供者身份和信誉进行评估，因此存在大量不可信数据提供者及恶意报价等行为。针对这些问题，本文将逆向竞价拍卖机制引入到物联网搜索数据采集，给出了最优数据质量生成和最优报价方法，该方法能防止不可信数据提供者的恶意报价及不按预定数据质量提供服务问题。

### 3 数据提供模型

如图 1 所示，所提出的模型中包含  $n+1$  个不同类型的机构或个体：1 个物联网搜索中心  $S$  和  $n$  个隶属于不同机构的潜在数据提供方  $o_i (1 \leq i \leq n)$ 。当物联网搜索中心向潜在数据提供方众筹某种类型的数据时，首先评估对数据质量的最低需求及价值评分函数，而后将这些信息广播给潜在数据提供方，接收潜在数据提供方所提供的投标、依据价值评分函数选择最优投标，从而确定数据提供方，当接收完成数据之后向数据提供方支付报酬。假设  $n$  个潜在数据提供方均能够提供相同类型的数据，但其提供数据的质量不同（如采样频率不同）。每个潜在数据提供方依据物联网搜索中心制定的竞价规则进行投标，当某个潜在数据提供方被物联网搜索中心选中作为获胜者后，按照所承诺的方式提供数据，之后从搜索引擎中心获得相应报酬。

同时，假定搜索中心关注的的数据质量参数数量为  $m$ ，用  $(r_1, \dots, r_m)$  表示，搜索中心所接受的最低数据质量用  $(\underline{r}_1, \dots, \underline{r}_m)$  表示，即对任意的  $1 \leq k \leq m$ ，均有  $r_k \geq \underline{r}_k$ 。确定数据参数和最低数据质量之后，

物联网搜索中心分析拟采集的数据对自身的价值，定义价值计算函数。  $V(r_1, \dots, r_m)$  价值计算函数的假设如下（这 2 种假设一致于经济学中的基本假设<sup>[22]</sup>）。

$$1) \text{ 对所有的 } k(1 \leq k \leq m) \text{ 有 } \frac{\partial V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} \geq 0,$$

即数据价值函数  $V(r_1, \dots, r_m)$  随  $r_k$  单调递增。如分析某区域内人口实时密度时需要采集噪音量，影响分析准确性的参数至少包括：噪音传感器节点在地理位置上的分布密度、数据精度及稳定度。分布密度越大、精度越高及稳定度越大，其数据的价值越大。

上面假设蕴含了参数  $r_k$  的值越大，数据质量越大；在“参数值越小数据质量越大”的情况下，可采用对参数进行变化（如求倒数）以保障数据质量随参数  $r_k$  的值增加而增大。

$$2) \text{ 对所有的 } k(1 \leq k \leq m) \text{ 有 } \frac{\partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2} \leq 0,$$

即边际效用单调递减：随着数据质量的增加，物联网搜索中心从连续增加一单位质量所带来的收益增加量不会变大。如上述例子，当地理分布密度非常大时，每增加一单位的密度带来收益增加量会变小或不变。

在拟定最低数据质量参数值及价值计算函数后，物联网搜索中心向所有潜在数据提供方发布最低数据质量需求  $(\underline{r}_1, \dots, \underline{r}_m)$  和数据价值计算函数  $V(r_1, \dots, r_m)$ ，并给出竞标者胜出规则：数据提供方所提供的数据在满足给定数据质量  $(\underline{r}_1, \dots, \underline{r}_m)$  的前提下，性价比大于等于 1 的最高者被选为获胜者。即

$$Winner = \arg \max_i \frac{V(r_i, \dots, r_i)}{p_i}$$

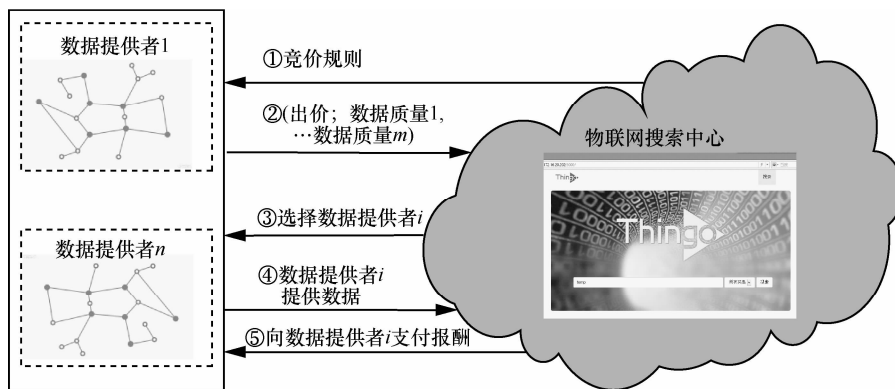


图 1 系统模型

其中, 对所有的  $1 \leq k \leq m$  均满足  $r_k \geq \underline{r}_k$ , 且潜在数据提供者  $i$  被选为获胜者的前提条件之一是  $p_i \leq V(r_1, \dots, r_m)$ 。

上述竞标规则规定了获胜者的要价必须小于他所提供数据对搜索中心的价值, 因此, 即使仅存在一个潜在数据提供者, 也不可能漫天要价。

在数据提供方方面: 每个潜在数据提供方  $o_i$  的投标定义为  $m+1$  元组  $(p_i, r_1, \dots, r_m)$ 。其中,  $p_i$  表示提供方  $o_i$  提供该次数据服务所期望的报酬 ( $1 \leq i \leq n$ ),  $r_k$  表示提供方  $o_i$  关于第  $k$  个参数所能提供的数据质量 ( $1 \leq k \leq m$ )。潜在数据提供方采集数据需要一定的成本  $C_i$ , 成本随数据质量变化而变化。因此成本是关于数据质量的函数  $C_i(r_1, \dots, r_m)$ , 对成本函数做出如下 2 种假设 (这 2 种假设一致于经济学中的基本假设<sup>[22]</sup>)。

$$1) \text{ 对所有的 } k(1 \leq k \leq m) \text{ 有 } \frac{\partial C_i(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} \geq 0,$$

即成本  $C_i(r_1, \dots, r_m)$  随数据质量  $r_k$  单调递增或保持不变。如节点在地理上分布密度越密集, 采集所需要的成本越高。

$$2) \text{ 对所有的 } k(1 \leq k \leq m) \text{ 有 } \frac{\partial^2 C_i(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2} \geq 0,$$

即边际质量成本是递增的: 随着数据质量的增加, 提供方连续增加的一单位质量所带来的成本增加量不会降低。如当噪音感知节点的地理分布密度非常大时, 每连续增加一单位的密度带来成本增加量会变大或保持不变。

由于  $(p_i, r_1, \dots, r_m)$  为  $o_i$  所提供的投标, 因此对于理性的潜在数据提供者, 其投标应满足  $p_i \geq C(r_1, \dots, r_m)$ 。目前多数拍卖均基于收益最大化, 即最大化  $V(r_1, \dots, r_m) - p_i$ , 这适用于采购方资金充足的拍卖。在资金不充足的情况下性价比是一个极其重要的决策因素。下面给出一个例子来说明, 假设存在 2 个潜在数据提供方  $o_1$  和  $o_2$  提供两组不同质量的数据, 且所提供的数据质量均满足搜索中心的需求, 其要价  $p_i$  及其对搜索中心的价值  $V_i$  如表 1 所示。若采用收益最大化作为胜出规则, 则  $o_1$  将是获胜者; 相反, 做采用性价比最大化作为胜出规则, 则  $o_2$  将是获胜者。在资金有限的情况下, 搜索中心更乐意选择  $o_2$ , 因为它可以利用选择  $o_1$  所需要的多支付资金做其他更为有价值的事。

表 1 潜在数据提供方的要价及其价值

潜在数据提供方	要价 $p_i$	价值 $V_i$	收益 $(V_i - p_i)$	性价比 $\left(\frac{V_i}{p_i}\right)$
$o_1$	35	60	25	1.71
$o_2$	20	40	20	2

由于在物联网搜索中数据提供者是开放的, 存在众多身份不可预知的潜在数据提供方。这些提供方除了可信竞标者之外, 还有标恶意竞标者, 受控的移动僵尸网络等。本文定义 2 类恶意竞标者。1) 提供的投标中存在  $k(1 \leq k \leq m)$  使所提供的数据的质量  $r_k \leq \underline{r}_k$ , 这类竞标者的主要目标是消耗搜索中心的资源。当大量受控的移动僵尸网络终端在线恶意竞标时易导致 DDOS 攻击。2) 获胜者  $o_i$  以低于预定数据质量的方式提供数据, 即对于  $o_i$  投标中的预定数据质量  $(r_1, \dots, r_m)$  和实际提供的数据质量  $(r'_1, \dots, r'_m)$ , 存在  $k(1 \leq k \leq m)$  使  $r'_k < r_k$ , 从而给搜索中心带来损失。为了防止这两类恶意竞标者, 本文引入半惩罚机制(称之为 semi-pay 机制): 任意竞标者  $o_i$  在拍卖之前, 必须支付一定的押金  $d$ , 满足  $d > c^\alpha$ 。其中,  $c$  表示  $o_i$  未按照最低数据质量需求投标给搜索中心带来的损失  $c_1$  或未按照承诺的数据质量提供数据给搜索中心带来的损失  $c_2$  的最大值, 即  $c = \max\{c_1, c_2\}$ ;  $0 < \alpha \leq 1$  为风险偏好系数, 将在后文讨论。对于任意的竞标者  $o_i$ , 若: 1)  $o_i$  所给出投标的数据质量低于  $(\underline{r}_1, \dots, \underline{r}_m)$ ; 2)  $o_i$  以低于预定数据质量的方式提供数据, 则搜索中心扣留  $o_i$  所支付的押金  $d$ ; 否则, 在竞标完成之后, 搜索中心向非获胜者返回所有的押金, 在获胜者以预定的数据质量提供数据之后, 返回其押金和报酬。

## 4 博弈分析

本节采用博弈论对上述激励机制进行分析, 包括两方面: 1) 上述机制能否有效防范攻击者; 2) 非攻击者的最优投标生成方法。

### 4.1 攻击者决策机制

在竞价拍卖中竞标者首先提交投标, 搜索中心依据所有竞标者的投标选择获胜者, 最后获胜者依据投标提供数据。由此可以看出这种拍卖具有序贯特性, 因此, 攻击者与搜索中心的交互过程可建模为动态博弈。图 2 给出了攻击者投标中数据质量小于给定阈值下的动态博弈树 (类似地, 可给出攻击

者所提供数据的质量小于投标中预订数据质量的动态博弈树，这里不再讨论）。图 2 中的每个分支表示博弈方的策略，树叶上的标签（即 A-E 上的标签）表示博弈方双方的收益。

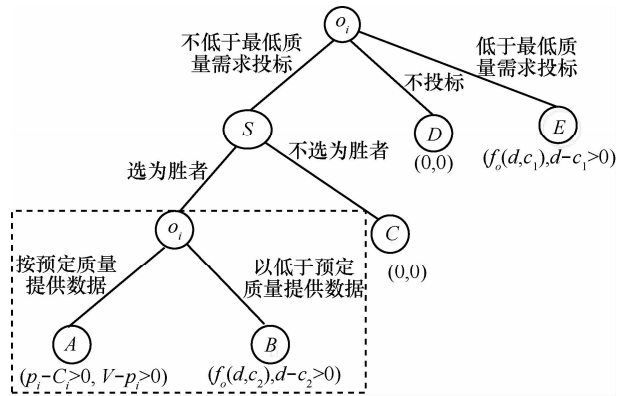


图 2 攻击博弈

在图 2 中，叶子节点 A 表示潜在数据提供者  $o_i$  以不低于 S 所拟定最低质量需求投标、而后 S 选中该投标为最优投标，最后  $o_i$  按照预定质量提供数据。由于潜在数据提供者  $o_i$  按照预定的流程，因此，此潜在数据提供者为非攻击者。此时，潜在数据提供者  $o_i$  和搜索中心 S 所获得的收益分别为  $p_i - C_i$  和  $V - p_i$ ，由投标策略可知  $p_i - C_i$  和  $V - p_i$  必定大于 0。

叶子节点 B 表示潜在数据提供者  $o_i$  以不低于 S 所拟定最低质量需求投标，而后 S 选中该投标为最优投标，但  $o_i$  以低于预定质量提供数据。若  $o_i$  为非攻击者（如因为偶然原因不能按照预定质量提供数据），则其收益为  $-d < 0$ ；若为攻击者，依据攻击者类型不同（如厌恶风险(risk aversion)、风险中性(risk neutral)和风险追求(risk seeking)），其收益定义不同，本文用函数  $f_o$  表示其风险收益，后面将详细讨论。图 2 中仅给出了攻击者的收益。在节点 B 上，搜索中心的效用为没收  $o_i$  的押金与未按照最低数据质量需求投标给搜索中心带来的损失之差，即  $d - c_2$ ，由押金定义可知  $d - c_2 > 0$ 。

叶子节点 C 表示潜在数据提供者  $o_i$  以不低于 S 所拟定最低质量需求投标，但未被选为获胜者。叶子节点 D 意味着  $o_i$  未参与投标。在这 2 种情况下， $o_i$  和 S 的收益均为 0。

叶子节点 E 表示潜在数据提供者  $o_i$  以低于 S 所拟定最低质量需求投标。在这种情况下， $o_i$  不会选

中为优胜者。由于 S 将最低数据质量需求广播给所有潜在数据提供者，潜在数据提供者知道最低数据质量却仍然以低于最低质量投标，这表明  $o_i$  以很大的概率为攻击者。 $o_i$  的效用函数用  $f_o$  表示，类似于节点 B，S 的效用为  $d - c_1 > 0$ 。

如前所述，本文所考虑的两类攻击者均以攻击对方造成更大的损失为目标，其效用定义为  $f_o(d, c) = c - d^\alpha$ ，其中， $0 < \alpha \leq 1$  为风险偏好系数。 $0 < \alpha < 1$  意味着该攻击者为风险追求者，会不惜代价攻击 S； $\alpha = 1$  表明该攻击者为风险中立者，它不在乎眼前的损失，而在乎谁的损失更多。给定风险偏好系数，搜索中心可设置押金  $d > c^{\frac{1}{\alpha}}$ 。由于本文只关注风险追求者 ( $0 < \alpha < 1$ ) 和风险中立者 ( $\alpha = 1$ )，因此有  $d > c^{\frac{1}{\alpha}} > c$ 。

**命题 1** 若  $d > c^{\frac{1}{\alpha}}$ ，且  $o_i$  所提供的数据性价比在所有投标中最高，则在 semi-pay 机制中策略组合（{不低于预定最低质量需求投标, 按预定质量提供数据}，选为优胜者）是唯一的子博弈完美纳什均衡。

**证明** 采用逆向归纳法可知，投标博弈包括 3 步。首先分析博弈的第 3 步中（即图 2 中虚框所示的子博弈） $o_i$  的最优策略，即分析  $o_i$  是否按预定质量提供数据。由  $p_i - C_i > 0$ ， $f_o(d, c_2) = c_2 - d^\alpha \leq c - d^\alpha < 0$ ，即  $p_i - C_i > f_o(d, c_2)$ ，因此， $o_i$  的最优策略为“按预定质量提供数据”。因此，在第 3 步子博弈均衡点，双方的收益为  $(p_i - C_i, V - p_i)$ 。此时，整个博弈等价于图 3 所示的博弈。下面分析博弈的第 2 步中（即图 3 中虚框所示的子博弈）S 的最优策略。由于  $V - p_i > 0$ ，因此，选为优胜者是图 3 虚框的 S 的最优策略，此时，双方的收益为  $(p_i - C_i, V - p_i)$ 。博弈的第 1 步如图 4 所示，由于  $f_o(d, c_1) = c_1 - d^\alpha \leq c - d^\alpha < 0 < p_i - C_i$ ，因此  $o_i$  在第 1 步的最优策略为“不低于预定最低质量需求投标”。命题得证。

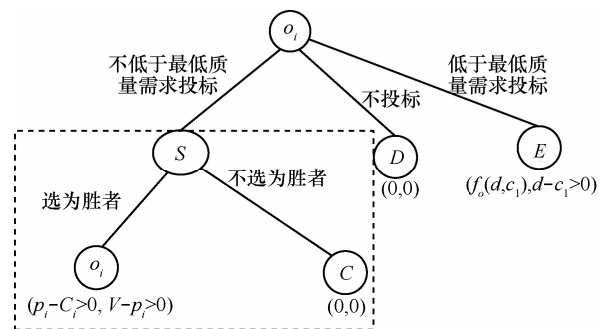


图 3 与图 2 等价的博弈

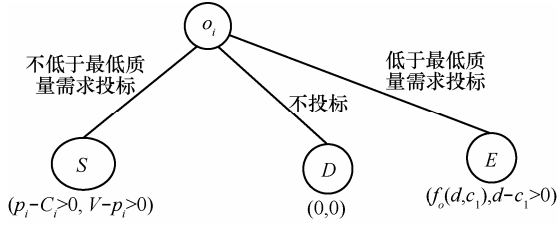


图4 与图3等价的博弈

注意：由于  $d$  是由搜索中心设定，因此搜索中心可设定  $d$  使  $f_o(d, c) < 0$ ，从而威慑攻击者，防止恶意投标。然而若存在恶意投标者是风险极度最求者（即效用函数  $f_o(d, c)$  定义中的  $\alpha$  逼近于 0），这将使  $d$  过大，从而使非恶意攻击者放弃投标。在这种情况下如何震慑攻击者、同时激励非恶意攻击者是未来的工作方向。

### 4.2 最优投标生成方法

本节讨论非攻击者的最优投标生成方法，包括两部分：竞拍者投标中最优数据质量参数生成方法和最佳报价方法。

最优数据质量参数生成：在收益最大化的拍卖（即最大化  $V(r_i, \dots, r_m) - p_i$ ）中，给定竞拍人，其收益最大化的数据质量独立于自身报价和其他竞拍人<sup>[22]</sup>。本文所提出的性价比最大化的竞价中有类似的结论如下。

**命题 2** 给定数据提供者  $o_i$  的成本函数  $C(r_i, \dots, r_m)$  及搜索中心的价值函数  $V(r_i, \dots, r_m)$ ， $o_i$  的最优数据质量  $r_{ik}^*$ （即最大化  $o_i$  的收益一成本比）独立于自身报价、其他竞拍人的报价与数据质量，为

$$r_{ik}^* = \arg \max_{r_{ik}} \frac{V(r_i, \dots, r_m)}{C(r_i, \dots, r_m)}$$

其中， $1 \leq k \leq m$ 。

**证明**（反证法）：假定  $(r_i^*, \dots, r_m^*)$  不是  $o_i$  的最优投标的数据质量，则存在投标  $(p_i', r_i', \dots, r_m')$  使

$\frac{p_i'}{C(r_i', \dots, r_m')}$  最大，其中，至少存在一个  $k (1 \leq k \leq m)$

使  $r_{ik} \neq r_{ik}^*$ 。给定  $(p_i', r_i', \dots, r_m')$  和  $(r_i^*, \dots, r_m^*)$ ，令

$$p_i^* = p_i \frac{V(r_i^*, \dots, r_m^*)}{V(r_i, \dots, r_m)}$$

$$\frac{V(r_i^*, \dots, r_m^*)}{p_i^*} = \frac{V(r_i, \dots, r_m)}{p_i} \quad (1)$$

对于搜索中心  $S$ ，2 个投标  $(p_i, r_i, \dots, r_m)$  和投标  $(p_i^*, r_i^*, \dots, r_m^*)$  的性价比相同。因此， $S$  选中这 2 个投标的概率相同。下面证明

$$\begin{aligned} \frac{p_i}{C(r_i, \dots, r_m)} &\leq \frac{p_i^*}{C(r_i^*, \dots, r_m^*)} \\ &= \frac{p_i}{C(r_i, \dots, r_m)} \\ &= \frac{p_i^* V(r_i, \dots, r_m)}{C(r_i, \dots, r_m) V(r_i^*, \dots, r_m^*)} \quad (\text{由式(1)得到}) \\ &\leq \frac{p_i^* V(r_i^*, \dots, r_m^*)}{C(r_i^*, \dots, r_m^*) V(r_i^*, \dots, r_m^*)} \quad (\text{由 } r_{ik}^* \text{ 定义得到}) \\ &\leq \frac{p_i^*}{C(r_i^*, \dots, r_m^*)} \end{aligned}$$

由此可得到  $(r_i^*, \dots, r_m^*)$  是  $o_i$  最优投标中的数据质量。从  $r_{ik}^*$  的定义可得最优数据质量  $r_{ik}^*$ （即最大化  $o_i$  的收益一成本比）独立于自身报价、其他竞拍人的报价与数据质量，命题得证。

为了计算数据提供者  $o_i$  的最优数据质量  $r_{ik}^*$ ，需要求解使得  $\frac{V(r_i, \dots, r_m)}{C(r_i, \dots, r_m)}$  最大的参数值。为方便叙述，记  $f(r_1, \dots, r_m) = \frac{V(r_1, \dots, r_m)}{C(r_1, \dots, r_m)}$ ， $\frac{\partial f}{\partial r} = (\frac{\partial f}{\partial r_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial r_m})$  及

$$\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial r_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial r_1 \partial r_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial r_1 \partial r_m} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial r_2 \partial r_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial r_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial r_2 \partial r_m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial r_m \partial r_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial r_m \partial r_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial r_m^2} \end{bmatrix}$$

假设  $(a_1, \dots, a_m)$  为  $\frac{V(r_i, \dots, r_m)}{C(r_i, \dots, r_m)}$  的驻点，即

$$\frac{\partial f}{\partial r_k} \Big|_{r_1=a_1, \dots, r_m=a_m} = 0 \text{ 成立，有如下命题。}$$

**命题 3** 在 3 节的假设中，若 1)  $\frac{\partial^2 C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2}$  和  $\frac{\partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2}$  不同时为零；2) 对任意的  $1 \leq k < l \leq m$  有  $\frac{\partial^2 C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k \partial r_l} = 0$  及  $\frac{\partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k \partial r_l} = 0$  成立；3) 驻点存在，则该驻点为极大值。

**证明** 令  $(a_1, \dots, a_m)$  为  $f(r_1, \dots, r_m)$  的驻点，为了

证明该命题，只需证明  $\frac{\partial^2 f}{\partial r_k^2}$  在  $(a_1, \dots, a_m)$  处是局部半负定的。对任意的  $k(1 \leq k \leq m)$ ， $f(r_1, \dots, r_m)$  关于  $r_k$  的一阶偏导数为

$$\frac{\partial f}{\partial r_k} = \frac{1}{[C(r_1, \dots, r_m)]^2} \left[ \frac{C(r_1, \dots, r_m) \partial V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} - \frac{V(r_1, \dots, r_m) \partial C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} \right]$$

相应地， $f(r_1, \dots, r_m)$  关于  $r_k$  的二阶偏导数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial r_k^2} &= \frac{1}{[C(r_1, \dots, r_m)]^2} \left[ \frac{C(r_1, \dots, r_m) \partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2} - \frac{V(r_1, \dots, r_m) \partial^2 C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2} - \frac{2}{[C(r_1, \dots, r_m)]^3} \right. \\ &\quad \left. \left[ \frac{C(r_1, \dots, r_m) \partial V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} - \frac{V(r_1, \dots, r_m) \partial C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} \right] \frac{\partial C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} \right] \end{aligned}$$

由于  $(a_1, \dots, a_m)$  是  $f(r_1, \dots, r_m)$  的驻点，且  $\frac{\partial^2 C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2}$  和  $\frac{\partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k^2}$  总是小于等于零、且不同时为零，因此，对任意  $k(1 \leq k \leq m)$ ，关于  $r_k$  的二阶偏导数均小于零，即

$$\frac{\partial^2 f}{\partial r_k^2} \Big|_{r_1=a_1, \dots, r_m=a_m} < 0 \quad (2)$$

对任意的  $1 \leq k < l \leq m$ ， $f(r_1, \dots, r_m)$  关于  $r_k$  和  $r_l$  的二阶混合偏导数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial r_k \partial r_l} &= \frac{1}{[C(r_1, \dots, r_m)]^2} \left[ \frac{C(r_1, \dots, r_m) \partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k \partial r_l} - \frac{V(r_1, \dots, r_m) \partial^2 C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k \partial r_l} - \frac{2}{[C(r_1, \dots, r_m)]^3} \right. \\ &\quad \left. \left[ \frac{C(r_1, \dots, r_m) \partial V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} - \frac{V(r_1, \dots, r_m) \partial C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k} \right] \frac{\partial C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_l} \right] \end{aligned}$$

由于假设  $\frac{\partial^2 C(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k \partial r_l} = \frac{\partial^2 V(r_1, \dots, r_m)}{\partial r_k \partial r_l} = 0$ ，且  $(a_1, \dots, a_m)$  是  $f(r_1, \dots, r_m)$  的驻点。因此，对任意的  $1 \leq k < l \leq m$ ， $f(r_1, \dots, r_m)$  关于  $r_k$  和  $r_l$  的二阶混合偏导在驻点处等于零，即

$$\frac{\partial^2 f}{\partial r_k \partial r_l} \Big|_{r_1=a_1, \dots, r_m=a_m} = 0 \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \Big|_{r_1=a_1, \dots, r_m=a_m} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial r_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial r_1 \partial r_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial r_1 \partial r_m} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial r_2 \partial r_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial r_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial r_2 \partial r_m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial r_m \partial r_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial r_m \partial r_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial r_m^2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} <0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & <0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & <0 & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & <0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

是局部负定的，由此可知命题 3 成立。

由于满足命题 3 中所给条件的成本函数和价值函数，直接可求解  $f(r_1, \dots, r_m)$  的驻点来获得最佳数据质量参数。若命题 3 中条件 2) 不成立，但  $\frac{\partial^2 f}{\partial r_k^2}$  在驻点处是局部半负定的，仍然可通过求驻点来获得最佳数据质量参数。这是因为  $\frac{\partial^2 f}{\partial r_k^2}$  在驻点处局部半负定是驻点为极大值的充分必要条件，而命题 3 中条件 2) 仅为  $\frac{\partial^2 f}{\partial r_k^2}$  在驻点处是局部半负定的充分条件，而非必要条件。

最优价格参数生成：从命题 2 可知，数据提供者的最优数据质量独立于自身报价、其他竞拍人的报价与数据质量，即数据提供者不需要获取其他数据提供者的数据质量和价格。从命题 3 可知，通过求解驻点可获得最优数据质量  $(r_1^*, \dots, r_m^*)$ 。一旦获得  $(r_1^*, \dots, r_m^*)$ ，潜在数据提供方可依其成本函数  $C(r_1, \dots, r_m)$  来计算在该最优数据质量下所需要的成本。为了简洁，在后文中用  $C_i$  表示第  $i$  个数据提供者在最优数据提供质量  $(r_1^*, \dots, r_m^*)$  下的成本，用  $V_i$  表示第  $i$  个数据提供者提供质量  $(r_i^*, \dots, r_m^*)$  对搜索中心的价值。

为了计算数据提供者的最优报价，假设：1) 每个数据提供者  $i$  知道其他数据提供者  $j$  在最优数据质量  $(r_1^*, \dots, r_m^*)$  下成本在区间  $[C_j, \bar{C}_j]$  概率分布  $F_j(\cdot)$ ，其中， $\underline{C}_j$  和  $\bar{C}_j$  分别是成本的上界和下界，

但不知道  $j$  的成本  $C_j$ ；2) 每个数据提供者  $i$  知道其他数据提供者  $j$  所提供的数据与自己所提供的数据对于搜索中心  $S$  的价值比  $\delta_{ji} = \frac{V_j}{V_i}$ 。

本文考虑数据提供者在提供数据时希望最大化收益率，不失一般地，计算第 1 个数据提供者的收益率期望（其他提供者类似），如下

$$\frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m \text{Prob} \left\{ \frac{V_j}{p_j} < \frac{V_1}{p_1} \right\} \quad (4)$$

其中， $\text{Prob} \left\{ \frac{V_j}{p_j} < \frac{V_1}{p_1} \right\}$  表示第  $j$  ( $2 \leq j \leq m$ ) 个数据提供者所提供的数据对于搜索中心的性价比低于第 1 个数据提供者的概率。

一般地，数据提供者  $i$  的要价  $p_i$  是关于其成本  $C_i$  的函数  $ap(C_i)$ ，即  $p_i = ap(C_i)$ 。对于理性者，要价  $p_i$  关于  $C_i$  单调增加，因此，要价的反函数存在，对于一个理性的要价  $p_i$ ，存在唯一的  $C_i$  使  $C_i = ap^{-1}(p_i)$ 。由此，式(4)可重写为

$$\begin{aligned} & \frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m \text{Prob} \left\{ \frac{V_j * p_1}{V_1} < p_j \right\} \\ &= \frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m \text{Prob} \left\{ \frac{p_1 V_j}{V_1} < p_j \right\} \\ &= \frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m (1 - \text{Prob} \left\{ p_j < \frac{p_1 V_j}{V_1} \right\}) \\ &= \frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m (1 - \text{Prob} \left\{ ap^{-1}(p_j) < ap^{-1} \left( \frac{p_1 V_j}{V_1} \right) \right\}) \\ &= \frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m (1 - \text{Prob} \left\{ C_j < ap^{-1} \left( \frac{p_1 V_j}{V_1} \right) \right\}) \\ &= \frac{p_1}{C_1} \prod_{j=2}^m (1 - F_j(ap^{-1}(\delta_{j1} p_1))) \end{aligned} \quad (5)$$

由于存在  $x$  ( $\underline{C} \leq x \leq \bar{C}$ ) 使  $ap(x) = p_1$ ，因此式(5)可表示为

$$\frac{ap(x)}{C_1} \prod_{j=2}^m (1 - F_j(ap^{-1}(\delta_{j1} ap(x)))) \quad (6)$$

对数据提供者 1 来说，其目标是如何设定函数  $ap$  使得最大化式(6)，其极值条件式(6)的一阶导数为零，即

$$\left[ \frac{ap(x)}{C_1} \prod_{j=2}^m (1 - F_j(ap^{-1}(\delta_{j1} ap(x)))) \right]' = 0$$

求解该微分方程得到最优报价。

## 5 数值分析

以第 3 节中的噪音采集作为例子，假设影响分析准确性的参数包括：地理分布密度  $r_1$ 、节点精度  $r_2$  及稳定度  $r_3$ 。分别采用广泛使用对数累加<sup>[19]</sup>和幂函数累加的方式来计算搜索中心的价值计算函数与数据提供者的成本计算函数。首先考虑搜索中心的价值计算函数如下

$$V(r_1, r_2, r_3) = \begin{cases} w_0 \log(1 + \sum_{k=1}^3 w_k \log(1 + r_k)), & r_k > \underline{r}_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中， $w_1$ 、 $w_2$  和  $w_3$  分别为  $r_1$ 、 $r_2$  及  $r_3$  对价值的影响权值（称之为对数权）， $w_0$  为全局权值，所有参数值均大于 0。式(7)表明：1) 效用随地理分布密度、节点精度、节点稳定度增加而增加；2) 边际效用随地理分布密度、节点精度、节点稳定度增加而减少。

数据提供者的成本函数定义如下

$$C_i(r_1, r_2, r_3) = \tau_i (u_1 r_1^{t_i} + u_2 r_2^{t_i} + u_3 r_3^{t_i}) \quad (8)$$

其中， $u_i \geq 0$  为数据提供者赋予  $r_i$  的成本权重（称之为乘数权）， $t_i \geq 1$  为  $S$  赋予  $r_i$  的指数权重（称之为指数权），将影响边际成本增加的速度。当  $t_i = 1$  时， $\frac{\partial C}{\partial r_i} > 0$  及  $\frac{\partial^2 C}{\partial r_i^2} = 0$ ，这表明  $r_i$  对  $S$  的边际成本

是固定的；当  $t_i > 1$  时， $\frac{\partial C}{\partial r_i} > 0$  及  $\frac{\partial^2 C}{\partial r_i^2} = 0$ ，这意味着数据提供者的成本及边际成本均随  $r_i$  增大而增大。

成本函数对最优数据质量( $r_1, r_2, r_3$ )的影响。分析( $r_1, r_2, r_3$ )随成本函数中乘数权  $t_1$  的变化情况时，其他参数定义如下。

$W_1=W_2=W_3=u_1=u_2=u_3=1, t_2=t_3=1.1$ <sup>[21]</sup>，分析( $r_1, r_2, r_3$ )随指数权  $u_1$  的变化情况时，定义  $t_1=1.1$ ，其他参数保持不变<sup>[22]</sup>。基于命题 2，可计算最优数据质量。表 2 给出了最优数据质量( $r_1, r_2, r_3$ )随  $t_1$  和  $u_1$  的变化情况。从该表可以看出：1)  $r_1$  随  $t_1$  和  $u_1$  的增大而减小， $r_2$  和  $r_3$  随  $t_1$  和  $u_1$  的增大而增大；2)  $t_1$  变化时对( $r_1, r_2, r_3$ )的影响大于  $u_1$  变化时的影响；3) 当  $t_1$  和  $u_1$  变化时， $r_2$  和  $r_3$  总是相等的。上述现象的原

注 1 为了分析各类权值对最优数据质量的影响，本文设置对称参数值。  
注 2 在后面的数值分析中除了特别说明外，这些参数值保持不变。

因如下：1)  $t_1$  和  $u_1$  增大将导致由  $r_1$  所带来的成本增加高于性能的增加，从而应该降低  $r_1$ ，增加  $r_2$  和  $r_3$ ；2)  $t_1$  是指数权，对边际成本的影响大于  $u_1$  的影响；3)  $r_2$  和  $r_3$  所对应的其他参数是对称的，这使得  $r_2$  等于  $r_3$ 。

表 2 最优数据质量随乘数权和指数权的变化

$t_1$	$(r_1, r_2, r_3)$	$u_1$	$(r_1, r_2, r_3)$
1	(0.98,0.72,0.72)	1	(0.78,0.78,0.78)
1.1	(0.78,0.78,0.78)	1.1	(0.68,0.82,0.82)
1.2	(0.62,0.82,0.82)	1.2	(0.58,0.88,0.88)
1.3	(0.50,0.86,0.86)	1.3	(0.52,0.92,0.92)
1.4	(0.40,0.90,0.90)	1.4	(0.46,0.96,0.96)
1.5	(0.32,0.94,0.94)	1.5	(0.40,1.00,1.00)

价值函数对最优数据质量( $r_1, r_2, r_3$ )的影响：由于式(7)中的  $W_0$  不影响性能-成本比，因此  $W_0$  变化不会对( $r_1, r_2, r_3$ )产生影响。数值分析中定义  $t_1=1.1$ ，表 3 给出了( $r_1, r_2, r_3$ )随  $W_1$  的变化情况，表 3 表明：1) 在其他所有参数值不变时， $W_1$  越大， $r_1$  的值越大(表 3 左虚框所示)；2) 当  $W_1, W_2$  和  $W_3$  均变化时，对数权值越大所对应的数据质量参数越大(表 3 下划线所示)。导致这 2 种现象的原因是对数权值越大，所带来的价值越大，所以应选择更大的数据质量参数来获得最大性能-成本比。

表 3 最优数据质量随对数权的变化

$W_1$	$(r_1, r_2, r_3)$	$(W_1, W_2, W_3)$	$(r_1, r_2, r_3)$
1.0	(0.78,0.78,0.78)	(1.5,1.8,2.0)	(0.42,0.78,0.84)
1.1	(0.86,0.72,0.72)	(3.0,2.5,5.0)	(0.28,0.10,1.04)
1.2	(0.96,0.66,0.66)	(2.0,2.5,1.9)	(0.52,0.86,0.46)
1.3	(1.02,0.60,0.60)	(4.0,8.0,5.0)	(0.04,0.94,0.26)
1.4	(1.10,0.54,0.54)	(3.0,2.5,1.9)	(0.88,0.60,0.24)
1.5	(1.16,0.48,0.48)	(4.0,3.0,2.0)	(0.98,0.52,0.04)

## 6 结束语

同传统的互联网搜索(如 Google、百度等)相比，物联网搜索在数据获取上存在重大不同：传统的互联网搜索中，数据主要源自于以信息传播为目的的 Web 页面、是公开的，因此，可采用爬虫等技术来获取数据；而且在物联网中，数据归属于机构或个人、具有隐私特征，不会免费公开，这使传统互联网搜索中的数据获取机制不适合物联网搜索，需要设计适合于物联网搜索的数据提供激励机制。

基于这种需求，本文将数据看成有价值的商品，提出了适用于物联网搜索的逆向拍卖机制，提出了面向性价比最优的投标生成方法，证明了所提出的拍卖能防止恶意竞价及不按预定数据质量提供服务。

在最优价格参数生成中，假设所有提供方知道自己与其他提供方的最优数据质量对搜索中心的价值比，然而在一些情况下难以获得准确的价值比。未来将放宽该条件，如只能获得价值比的概率分布函数。另外，如何获得通用的最优价格生成方法也是未来的工作方向。

## 参考文献：

- [1] 方滨兴, 刘克, 吴曼青, 等. 大搜索技术白皮书[M]. 国家自然科学基金委, 2015.
- [2] FANG B X, LIU K, WU M Q, et al. Big Search[M]. National Natural Science Foundation of China, 2015.
- [3] OSTERMAIER B, ROMERY K, MATTERN F, et al. A real-time search engine for the Web of things[A]. Internet of Things[C]. 2010.1-8.
- [4] SOLDATOS J, DRAIEF M, MACDONALD C, et al. Multimedia search over integrated social and sensor networks[A]. International Conference Companion on World Wide Web[C]. 2012.283-286.
- [5] FRANK C, BOLLIGER P, MATTERN F, et al. The sensor Internet at work: locating everyday items using mobile phones[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2008, 4(3):421-447.
- [6] CHRISTOPHE B, VERDOT V, TOUBIANA V. Searching the Web of things[A]. IEEE International Conference on Semantic Computing (ICSC)[C]. 2011.308-315.
- [7] PERERA C, ZASLAVSKY A, LIU C H, et al. Sensor search techniques for sensing as a service architecture for the Internet of Things[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(2): 406-420.
- [8] WANG H, TAN C C, LI Q. Snoogle: a search engine for pervasive environments[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(8): 1188-1202.
- [9] DING Z, CHEN Z, YANG Q. IoT-SVK search: a real-time multimodal search engine mechanism for the internet of things[J]. International Journal of Communication Systems, 2014, 27(6): 871-897.
- [10] SHEN H, MEMBER S, LIU J, et al. SCPS: a social-aware distributed engine cyber-physical human-centric search[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(2): 518-532.
- [11] CHEN Y, ZHOU J, GUO M. A context-aware search system for Internet of things based on hierarchical context model[J]. Telecommunication Systems, 2015,1-15.
- [12] NING T, YANG Z, WU H, et al. Self-Interest-driven incentives for ad dissemination in autonomous mobile social networks[A]. Proceedings of the Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)[C]. 2013.2310-2318.
- [13] ZHANG C, ZHU X, SONG Y, et al. C4: a new paradigm for providing incentives in multi-hop wireless networks[A]. Proceedings of the Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)[C]. 2011.918-926.

- [13] GUIZANI M, RACHEDI A, GUEGUEN C. Incentive scheduler algorithm for cooperation and coverage extension in wireless networks[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2013, 62(2): 797-808.
- [14] TENG J, ZHANG B, BAI X, et al. Incentive-driven and privacy-preserving message dissemination in large scale mobile networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(11):2909-2919.
- [15] GUO Y, YIN L, LIU L, et al. Utility-based cooperative decision in cooperative authentication[A]. IEEE International Conference on Computer and Communications[C]. 2014.1006-1014.
- [16] REFAEI M T, DASILVA L A, ELTOWEISSY M, et al. Adaptation of reputation management systems to dynamic network conditions in ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(5): 707-719.
- [17] MANSHAEI M H, ZHU Q, ALPCAN T, et al. Game theory meets network security and privacy[J]. ACM Computing Surveys(CSUR), 2013, 45(3):1-39.
- [18] LUO T, TAN H P, XIA L. Profit-maximizing incentive for participatory sensing[A]. IEEE International Conference on Computer and Communications(INFOCOM)[C]. 2014.127-135.
- [19] YANG D, XUE G, FANG X, et al. Crowdsourcing to smartphones: incentive mechanism design for mobile phone sensing[A]. The 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiComm)[C]. 2012.173-184.
- [20] ZHANG L, LI Z, WU C. Dynamic resource provisioning in cloud computing: a randomized auction approach[A]. IEEE International Conference on Computer and Communications (INFOCOM)[C]. 2014.433-441.
- [21] ZHAO J, LI H, WU C, et al. Dynamic pricing and profit maximization for the cloud with geo-distributed data centers[A]. IEEE International Conference on Computer and Communications(INFOCOM)[C]. 2014.118-126.
- [22] DAVID E, AZOULAY-SCHWARTZ R, KRAUS S. Bidding in sealed-bid and English multi-attribute auctions[J]. Decision Support Systems, 2006, 42(2): 527-556.

#### 作者简介:



殷丽华(1973-),女,辽宁朝阳人,中国科学院信息工程研究所副研究员,主要研究方向为物联网搜索、安全评估。



郭云川[通信作者](1977-),男,四川营山人,博士,中国科学院信息工程研究所副研究员,主要研究方向为物联网安全、形式化方法。E-mail: guoyunchuan@nelmail.iie.ac.cn。



张会兵(1976-),男,河南南阳人,博士,桂林电子科技大学讲师,主要研究方向为物联网、信任评估。