

# 机会群智感知网络关键技术

## Key Technologies of Opportunistic Crowd Sensing Network

熊永平/XIONG Yongping

刘伟/LIU Wei

刘卓华/LIU Zhuohua

(北京邮电大学, 北京 100190)  
(Beijing University of Posts and  
Telecommunications, Beijing 100190,  
China)

**群**智感知<sup>[1-2]</sup>就是在移动感知设备普遍存在的背景下提出的物联网新型感知模式。与传统有意识部署的固定无线传感网不同,它是将众包的思想与移动感知相结合,将普通用户的移动设备作为基本感知单元,并通过网络进行有意识或无意识的协作,形成群智感知网络,实现感知任务分发与感知数据收集,从而完成大规模的、复杂的社会感知任务。而这些任务仅依靠个体很难实现,例如,在交通拥堵状况和城市空气质量监测应用中,只有当大量的个体提供行驶速度或空气质量信息才有应用价值。

近年来,其他一些国家已经涌现出大量群智感知技术的应用和研究,包括收集交通路况的 CarTel,收集空气质量和污染物的 CommonSense,收集城市噪声信息的 NoiseSPY,收集骑车人的运动轨迹和身体状况的 BikeNet 等。然而当前的群智感知研究主要针对基于基础设施网络的集中式感知系统<sup>[3]</sup>。该系统中的移动设备一般预设通过蜂窝网络与互联网

收稿日期: 2015-09-10

网络出版时间: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61202436)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 06-0019-004

**摘要:** 认为机会群智感知网络能够充分利用移动终端在城市中分布密度高、相遇频繁以及作为移动终端携带者的人具有社会属性等特点,并利用移动终端之间的协作机会,从而实现了数据感知应用。提出了基于机会通信的机会群智感知网络的概念,并提出了机会群智感知网络的主要关键技术:大范围数据收集的机会传输技术、特定时空区域的数据分发技术、异步通信机会发现和人群真实移动行为建模等。同时,针对各关键技术提出了解决思路和技术路线。

**关键词:** 群智感知; 机会网络; 机会传输

**Abstract:** An opportunistic crowd sensing network leverages the dense distribution, frequent encountering, and social property of the carrier of mobile terminals in a city scenario. It then implements the data-sensing application based on the collaborative opportunistic transmission. In this paper, we propose the opportunistic crowd sensing network and discuss problems with its key technologies. There are problems with opportunistic transmission for data collection through a large area, data dissemination within a specific time-space area, asynchronous communication opportunity discovery, and realistic mobility model. We propose some solutions to these problems.

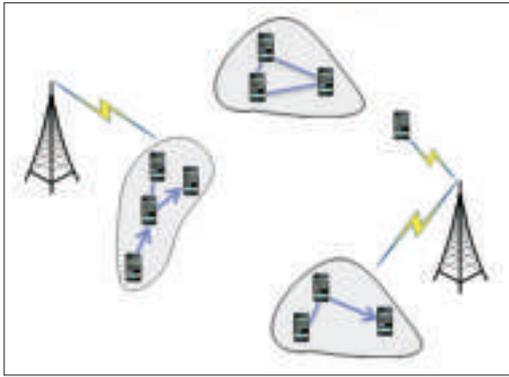
**Keywords:** crowd sensing; opportunistic network; opportunistic transmission

连接,并将当前设备采集的感知数据传输到数据中心。城市感知应用往往都需要持续收集大量的数据,甚至可能是大规模多媒体数据。这一方面将耗用户较多的网络流量和电量,导致收集成本高,降低用户参与热情影响系统可用性;另一方面也给蜂窝网络带来较大的负载压力。

考虑到移动终端在城市中分布密度高,相遇频繁,以及作为移动终端携带者的人具有社会属性等特点,集中式的群智感知网络结构并未充分利用移动终端之间的协作机会。当前的移动终端基本都具备了短距离无线通信技术如 Bluetooth 或 Wi-Fi,当设备进入彼此通信范围时,可以利用短距离无线技术交换数据,即

支持机会计算模式<sup>[4]</sup>。如图 1 所示,随着设备的持续移动,数据在多个移动设备之间中继传输,直到将数据传输到具有意愿上传的用户,例如电池容量高且具备低成本互联网链路(例如包月流量很大或 Wi-Fi 接入)的设备,进而上报到后端数据中心。

机会群智感知网络是由人携带的移动设备协作形成的移动机会网络<sup>[5]</sup>,移动设备的持有者随机地到达各个地方,随时随地进行感知,所产生的数据利用人移动所带来的通信机会多次转发后实现感知数据的传输,以完成感知任务。由于人群移动的自主性和随机性,很难存在端到端连通路径,机会群智感知网络采用“存储-携带-转发”工作模式,当节



▲图1 机会群智感知网络示意

点收到来自上一跳节点转发的数据后,携带该数据并等待下一跳转发机会的到来。利用这种模式,用户可以以很低的成本传输感知数据并参与感知任务,有利于推进群智感知应用的实用化。

机会网络领域作为近年来学术界关注的热点,已经产生了大量的研究成果。面向群智感知的机会网络和一般移动机会网络有着一些共同的问题,但也面临着不同的挑战。例如当前研究的机会路由要求每个节点具有全局统一标识,侧重研究从数据源节点如何路由数据到目的节点;而在机会群智感知网络中,源感知设备需要将数据通过机会转发到具有合适互联网链路的设备,进而上报到后端应用,可能并不知道目标设备的节点标识。又如群智感知系统采集实时拥堵信息,是一类具有时空特性的数据应用,这类数据生命周期短,且只对拥堵点周围区域的设备有效,与大范围长期收集的公共数据不同。因此并不需要传输到数据中心,只需要将数据持续分发给一个目标区域内的用户。因此我们提出了机会群智感知网络的几项关键技术。

## 1 面向大范围感知数据收集的机会传输

群智感知最主流的应用是低成本、大范围、持续收集感知数据,感知数据以机会转发的方式通过节点间协作在多个移动节点之间逐跳传输,

直到到达具有互联网链路的节点,进而将数据传输到后台的数据中心。这与普通移动机会网络的机会路由不同,感知节点并不知道感知数据消息的目标节点,机会传输的目的可以是任意一个或多个 Sink 节点。一方面根据不同的应用,感知数据收集需要满足采样频率、覆盖范围和收集延迟等指标要求;另一方面数据在移动节点之间协作传输需要耗费节点的能量和计算能力,在 Sink 节点则需要

耗费运营商提供的付费网络带宽。大多数群智感知任务都是公共服务,参与任务对用户的直接激励收益不明显,较高的传输代价将影响参与感知任务的用户积极性,进而降低感知网络的覆盖范围和可用性。

机会网络中的数据路由传输在机会网络研究中已经出现了丰富的成果<sup>[9]</sup>,机会路由机制涉及两个方面:(1)消息的复制份数。由于网络拓扑动态变化带来的传输不可靠,采用多拷贝能够增加传输成功率。机会路由的两个极端方法分别是单拷贝直接传输和每个相遇节点一份拷贝的流行性路由机制,过多的冗余拷贝会降低网络资源利用率,需要消除;(2)下一跳选择策略,即判断相遇节点是否为下一跳转发节点。获取网络状态信息越多,就越有利于选择策略的优化。

机会群智感知网络中的机会传输机制则需要考虑感知数据机会传输过程的相关性能指标,包括互联网链路传输成本、传输延时和能耗、传输成功率、数据量等。大部分移动终端都有成本不等的互联网链路,相当于 Sink 节点。在感知数据收集应用的机会网络中,感知数据只要传输到有意愿提供互联网链路的任意一个移动节点 Sink,就可以将数据上传到数据中心。因此如果将所有可能的 Sink 节点看成一个组,该过程则可以建成一个 Anycast 模型。

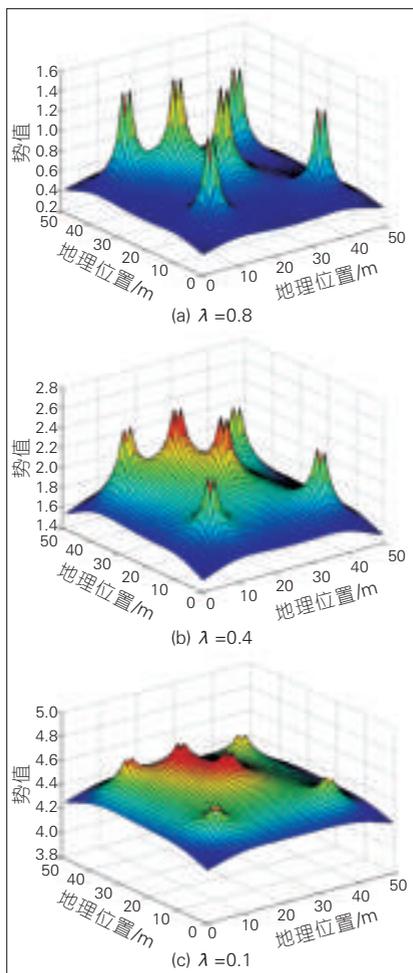
由于机会网络的间歇性连通和节点移动带来的拓扑结构动态变化,节点无法及时获取网络拓扑来计算到 Anycast 组节点的跳数距离。可以采用与每个组成员节点的相遇概率来表示节点与该组节点的距离,该概率可通过综合考虑节点与组成员节点的相遇频率、相遇持续时间以及节点间的相遇传递性来计算。此外,由于网络中有多个消息需要传输,为了降低网络的开销,消息以固定  $K$  个拷贝方式转发。在大规模的机会网络中,可能无法知道所有 Anycast 组节点的相关信息,仅考虑相遇概率最大的  $N$  个节点。

我们提出以下几种 Anycast 传输方法:

(1)基本方法。这种方法是以前节点最大的相遇概率为判别标准,通过记录节点到每一个组成员节点的相遇概率,同时记录相遇概率最大的组成员个数来决定将消息转发给哪个相遇节点。携带消息的节点如果遇到判别标准比它大的节点,就选择该节点为下一跳转发节点。这种方法符合 Anycast 组传输的基本思路,发送消息给最近的组成员节点。

(2)考虑组节点分布的方法。这种方法需要综合考虑与所有组成员节点的相遇概率,判别标准为相遇概率平均值。当与各个组节点的相遇概率相差不大时,该方法将消息转发到与更多成员节点相遇的节点。

(3)自适应的 Anycast 方法。这种方法采用类似势场的概念,把每个组成员节点看成一个场源电荷,每个节点的电势值与到该组节点的距离成反比。模拟电场如图 2 所示,假设组成员节点  $i$  在网络中形成一个势场,该势场在节点  $a$  上的势值计算公式为:  $C_a(i)^{-\lambda}$  ( $\lambda > 0$ ),其中  $C_a(i)$  是上一小节中定义的节点间的相对距离,而  $\lambda$  是势值下降速度。图 2 展示了 6 个成员节点的 Anycast 组在网络中形成的势场图,  $X$  和  $Y$  轴是地理位置坐标,  $Z$  轴是势值,可以看出:  $\lambda$  越大,节点到组成



▲图2 感知数据收集的Anycast势场模型

员节点的距离对电势值影响越大,单个组成员节点形成的势场下降越快;随着 $\lambda$ 值的减小,距离对势值的影响越来越小,而组成员密度对势值影响越来越大,即组成员节点越密集的区域势值越大。

## 2 面向时空局部有效感知数据的机会分发

机会群智感知网络的另一类重要应用是面向时空局部有效数据。例如,在某一地理区域内的道路拥堵或交通事故信息、银行等公共服务点排队信息、商场的临时促销信息等,这类信息具有时空局部有效性,传播的距离越远,经过的时间越长,这类信息的有效性就越低。同时,用户需求也具有这种时空特性,用户移动到

某个区域,更为关注当前区域附近的信息,对以前的信息和更远区域的信息可能不感兴趣。网络中的节点在感知到当前区域中的信息后,利用机会相遇将数据扩散到周边节点上,并在信息有效空间区域内的节点间进行协作扩散,以分发给目标区域上感兴趣的移动节点。

机会群智感知网络技术中最关键的是感知数据机会传播模型。时空局部有效的感知数据应该在一个相对受限的空间范围内传播。由于移动感知设备的自主随机移动,很难建立感知数据在多次转发后的传播模型。该传播模型主要和感知数据的动态扩散算法有关,感知数据限制在有效区域内扩散,因此人们需要研究根据给定的感知数据的传播延时、应用特性、区域节点密度以及网络负载等多种因素,以动态调整目标数据消息的转发策略和拷贝份数。

设计一个高效的数据分发机制,首先需要确定消息分发需求,并从典型应用出发,归纳具有时空特性消息的分发需求,包括消息的空间范围、分布密度和延迟以及各种消息的优先级等;其次需要详细分析影响消息分发机制性能的诸多因素及其之间的关系,如进入空间区域内移动节点数目、分布和移动模型,移动节点的缓存和通信带宽等网络资源以及消息的个数、类型、优先级和消息源的分布等;最后确定通信方式,针对单个节点移动轨迹的覆盖范围有限和机会网络间歇性连通的特点,可以在所遇到的节点中选择部分节点扩散消息,实现在非连通区域消息分发,维护消息在分发区域的密度。

假定在每个携带节点上维护一个节点状态值,则需要记录当前节点连续相遇的、没有携带感知数据的节点个数。当该节点连续遇到 $M$ 个未携带数据消息的节点,将生成一个感知数据的拷贝并传输给第 $M$ 个相遇的节点,并使之成为一个新的携带节点,然后将该状态值重置为0。此

外,当携带节点遇到任一个携带感知数据的节点都将状态值重置为0。每个节点的状态变化可以用一个Markov过程来刻画,节点遇到一个携带数据的节点是概率 $\rho$ ,遇到未携带数据的节点概率是 $1-\rho$ ,则变化过程可用如图3所示。

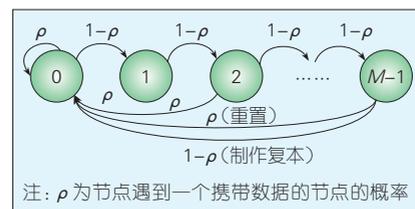
该Markov过程对应的转移概率矩阵表示如式(1)所示:

$$P = \begin{pmatrix} \rho & 1-\rho & 0 & \cdots & 0 \\ \rho & 0 & 1-\rho & \cdots & 0 \\ \rho & 0 & 0 & 1-\rho & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

该过程可以计算出节点处于 $M-1$ 状态的概率,还可以估算出携带消息的节点出现的速率。由于携带节点自主移动会不断离开目标区域,离开速率需要根据节点移动速度、区域面积和移动模型等参数计算。当携带节点生成速率等于其离开速率时,可以计算出当前的算法参数值 $M$ ,所有节点也可以根据当前观察到的节点移动速率和个数动态计算 $M$ 值,从而实现感知数据携带节点密度的稳态分布。

## 3 异步通信机会发现

机会群智感知网络节点采用短距离通信技术交换数据。探测发现通信范围内的邻居节点是实现感知数据机会传输的前提条件,对数据传输性能有非常重要的影响。在网络运行过程中,感知节点之间没有全局同步时钟,只能异步进行邻居探测。由于节点的随机移动性以及区域稀疏性,节点通常无法获知其他节点的运动状况,并且节点之间实际相遇维持时间往往较短,所以感知节点不仅



▲图3 Markov过程

需要在没有任何其他节点的预先信息的条件下异步实现邻居节点间的彼此探测,还需要满足探测及时和足够低的机会丢失率等性能要求。同时,由于移动节点能量有限,异步探测需要考虑能耗这一重要因素。为了减少节点探测机制产生的能耗,节点不可能频繁地发出探测信息,也不能容忍长期处于监听状态。

针对移动节点之间的通信机会发现,我们主要采用自适应的休眠调度方法,确保节点以高占空比降低功耗同时实现高效能。例如可以将两个邻居节点 A 和 B 的占空比  $D_A$  和  $D_B$  分别选择为  $D_A \approx 1/PA_1 + 1/PA_2$  和  $D_B \approx 1/PB_1 + 1/PB_2$  (其中  $PA$  和  $PB$  分别是两个节点的休眠周期,且满足两两互素)。根据中国余数定理,必然存在周期  $P$  满足在一个周期内节点 A 与节点 B 能够同时唤醒。但该算法对于给定的占空比,可以选择合适的素数对,并能够确定能发现周围出现的移动设备。

#### 4 人群移动行为建模

真实人群移动特性和移动模型是机会群智感知网络性能分析和传输机制设计的工作基础。真实移动环境中的移动模型,需要综合考虑人的物理特性和社会特性,其中物理特性是指人移动的物理规律,例如速度和方向的平滑变化等;而社会特性是指人的社会关系、行为偏好等。如何借鉴现有的移动模型方面的研究成果,并建立真实环境中的移动模型进而得到相遇机会的分布相当具有挑战性。

针对城市环境中真实人群移动行为,我们提出了一个移动模型。在该模型中,在不同的时间或空间下,人的移动模型是不同的:从空间的维度来看,人在不同场景下的移动模式是不同的;从时间的维度来看,人的日常社会活动具有一定的规律性。该模型构建如下:

(1) 真实移动场景建模。分析真

实环境中不同类型的移动场景,例如道路、广场和办公室等。借鉴已有的移动模型,考虑节点的物理特性、社会关系和场景特征。可结合可用的真实 trace 数据,对每种特定移动场景进行建模。

(2) 移动模型的构造。分析人日常社会活动的移动规律,将人在城市环境下的日常活动表示成不同场景间转移的过程,不同场景采用相应的移动模型来描述。根据统计概率可以生成以场景为状态的 Markov 过程;基于人社会活动的规律性,可以确定不同状态间的时变转移概率。如图 4 描述了在 4 个场景间社会特性确定的时变转移概率的实例。

(3) 移动模型的分析。分析模型的收敛性,以及与机会群智感知网络紧密相关的连接特性,包括节点相遇间隔、相遇持续时间等。

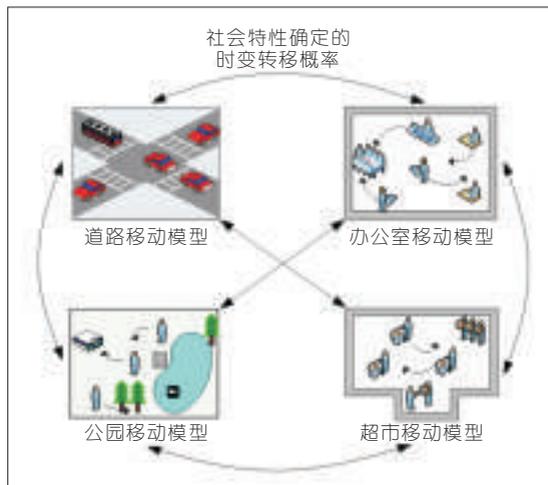
(4) 移动模型的验证。拟从 3 个方面综合评价移动模型:对比真实 trace 数据,评估该移动模型是否能真实描述节点的移动性;评价模型的易用性,以及是否具有完整的数学形态表达;评价移动模型参数的可控性和适用度,是否可通过调整参数准确描述不同的移动场景。

#### 5 结束语

智能终端正在快速普及和发展,由于终端的随身携带性,利用移动终端间的协作机会实现数据感知应用在大范围社会数据采集领域具有重要的应用潜力。文章提出了机会群智感知网络的概念和主要关键技术,并提出了一些技术解决思路,具有重要的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 刘云浩. 群智感知计算[J]. 中国计算机学会通讯, 2012, 8 (10): 38-41
- [2] GANTI R K, YE F, and LEI H. Mobile



▲ 图 4 城市环境中人的移动模型

- Crowdsensing: Current State and Future Challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(11): 32-39
- [3] MA H, ZHAO D, and YUAN P. Opportunities in Mobile Crowd Sensing [J]. Communications Magazine, IEEE, 2014, 52 (8): 29-35
  - [4] CONTI M and KUMAR M. Opportunities in Opportunistic Computing [J]. Computer, 2010, 43 (1): 42-50
  - [5] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 刘燕. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20 (1): 124-137

#### 作者简介



熊永平, 北京邮电大学副教授, 中国计算机学会无线传感器网络专委会委员; 主要从事移动协作网络、无线传感网和分布式计算等领域的研究工作; 先后主持参加基金和重大专项等 10 余项; 在知名期刊、会议上发表论文 30 多篇。



刘伟, 北京邮电大学讲师, 主要从事网络与信息安全、无线网络安全方面的研究工作。



刘卓华, 北京邮电大学讲师, 主要从事网络与信息安全、RFID 安全方面的研究工作。