

机会网络中基于移动特征的效用转发协议*

舒 坚^{a,b}, 董海星^{b,c}, 刘琳岚^{b,c}, 余 坤^{a,b}

(南昌航空大学 a. 软件学院; b. 物联网技术研究所; c. 信息工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 针对非社区网络中的主流转发协议未考虑到节点移动的非完全随机性, 提出一种基于移动特征的效用转发协议。每个节点关联两个移动特征——活跃度和相似度, 依靠活跃节点带动消息的适当发散和递交, 并通过相似度的判定和效用值的比较降低网络开销。仿真结果表明, 该协议在保持相对平稳的端到端延时的情况下, 可以提高消息递交率, 降低网络资源消耗。

关键词: 机会网络; 移动特征; 相似度; 活跃度; 效用

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)04-1489-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.080

Utility forwarding protocol based on mobile characteristic for opportunistic networks

SHU Jian^{a,b}, DONG Hai-xing^{b,c}, LIU Lin-lan^{b,c}, YU Kun^{a,b}

(a. School of Software, b. Internet of Things Technology Institute, c. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: For forwarding protocol in no-community networks does not consider the non-totally random node mobility, this paper presented an utility forwarding protocol based on mobile characteristic (BMCU). It described the node characteristic during moving by similarity and activity. In order to complete appropriate divergence and submission of message, it used the more active nodes to get copy of message from the sender. It suppressed divergence of the copies by similarity and utility comparison. Simulation results show that BMCU can get higher delivery ratio, also improve the routing efficiency with relatively stable delay and lower energy consumption.

Key words: opportunistic networks; mobile characteristic; similarity; activity; utility

0 引言

机会网络是移动自组网的演化^[1], 其主要特征表现在不要求网络中传送数据的源节点和目标节点之间存在一条完全连通的路径。在现实情况下, 由于障碍物、信号屏蔽、节点移动、节点稀疏等原因, 往往无法保证网络的全连通, 因此节点可移动的机会网络应用非常广泛, 涉及到多种领域, 如军事应用、灾难修复、work (PSN)、运输网络 (transportation network)、野生动物监控、水下传感网络、Pocket Switched、不发达地区网络部署等。目前较著名的应用有斑马追踪实验 ZebraNet^[2]、手持设备交换网^[3]、车载网络^[4]、水下网络^[5]等。

在机会网络中节点移动使得节点与其他节点相遇而形成通信机会, 消息随着节点的移动, 在移动节点之间转发从而实现传输, 因此如何设计高效的转发协议是实现机会网络中数据通信的关键。在实际的机会网络应用中, 移动节点受控于载体, 而载体通常为人、车辆、动物, 他们的运动总是呈现出一定的规律性, 现有的多数转发协议都认为节点的移动是完全随机的, 极少针对载体的特征进行设计, 因此如何利用这些规律来辅助转发协议的设计具有重要的研究意义。

1 相关工作

1.1 机会转发协议中的关键问题

由于机会网络中节点间通信时断时连, 没有完全的连通, 这种苛刻的网络环境使得如何保证高性能的数据转发成为了研究热点^[6]。在转发协议的设计中, 主要有以下两个关键问题^[7]:

a) 节点信息的不确定性。数据的发送者对网络中其他节点的信息知之甚少, 因此机会转发要解决的一个关键问题就是: 当载有数据的节点遇到一个中继时, 应该遵循什么规则来确定是否转发数据。

b) 网络资源消耗。在机会网络中一般同时存在同一个数据的多份副本, 这样可以提高数据传输的到达率、减少传输时延。但是节点缓存多份副本需要增加节点的缓存和消耗有限的网络资源, 所以需要权衡数据到达率最大化、传输时延最小化和资源消耗最小化之间的矛盾。

1.2 研究现状

近几年来, 国内外相关科研人员已经对机会网络的转发协议进行了大量的研究, 并取得了一定的成果。目前较为经典的

收稿日期: 2011-07-21; 修回日期: 2011-08-23 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60773055); 航空科学基金资助项目 (2010ZC56008)

作者简介: 舒坚 (1964-), 男, 教授, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统、软件工程 (shujian@jxjt.gov.cn); 董海星 (1987-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统; 刘琳岚 (1968-), 女, 教授, 学士, 主要研究方向为无线传感器网络、分布式系统; 余坤 (1987-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统。

机会转发协议主要有基于冗余和基于基本效用的转发协议。基于冗余的转发协议的主要思想是产生源消息的多份拷贝 (L), 通过增加网络的消息拷贝数来提高数据传输率, 这种方法中有两个极端, 一种是 $L=1$ 的情况, 如直接传送^[8], 源节点只有在遇到目标节点时才将信息传送给对方, 这种方法的网络开销小, 但传输成功率低。另一个是 L 趋于 ∞ 的情况, 如 Epidemic^[9] 算法, 该方法数据传输成功率高、延时小但网络开销很大。其他基于冗余的转发都是在直接传送与 Epidemic 之间取一个传输成功率与网络开销的平衡, 如 SELF^[10] 通过自我限制控制传染范围, K-kopy^[11] 以参数 K 固定节点能够分发的副本数。基于冗余的转发, 在节点相遇时并没有遵循一个合理的规则来确定是否转发, 如直接传送只要不是目的节点都不转发, 而在 Epidemic 中是只要节点相遇就转发。

针对上述协议中消息转发的盲目性, 基于效用的转发协议利用机会网络的状态信息来决定当节点相遇时是否转发消息, 该机制建立一个预测函数来估算节点的效用^[12], 节点的效用越高意味着节点具有更高的概率遇到目标节点。对于效用的估算可根据不同的参数来进行, 主要包括基于相遇预测、链路估计、上下文信息三类。基于相遇预测的如 ZebraNet 实验, 每个动物维护一个到目标节点的概率, 当节点相遇时消息由概率低的转发给概率高的。基于链路估计的如 MEED^[13] 以其链路延迟为参数估算效用值, 使用消息到达目标节点的传输最短延时作为转发决策依据。基于上下文信息的如 CAR (context-aware routing)^[14] 使用剩余能量、拓扑变化率、到达目标节点的概率、移动速度等参数综合计算效用值。HiBoP^[15] 是基于历史上下文信息的转发机制, 以节点当前信息和历史信息中的参数综合计算效用值。NEUROROUTER^[16] 是以节点的状态信息如速度、方向、距离等参数作为输入值, 通过神经网络计算得出输出值 (即效用值)。基于效用的转发是一种单副本的转发机制, 能够有效降低网络负荷, 但在网络节点稀疏且相遇概率不高的情况下, 传送成功率不高。针对上述单副本的效用机制存在的缺陷, 研究人员进一步提出了相关的改进机制, 如 Prophet^[17], 一方面利用信息的冗余进行多路传送, 另一方面基于节点的效用选择合适的转发方向。相关模拟实验表明, 这些策略在成功率和传输延迟上都有较好的控制。Prophet 方案是 Epidemic 与效用结合来减小网络开销比较成功的例子, 但它对网络中副本数的控制不具收敛性。

非社区网络中现有的主流转发协议都认为节点的移动是完全随机的, 然而在实际应用场景中由于节点的载体通常为人、动物、车辆等, 因此总会有一定的移动规律和特征。文献^[18]认为现实场景中节点的移动并非完全随机而是呈现出一定的特征, 并提出节点的移动具有地理偏好性, 以频繁位置抵达率来描述节点的这种移动特征。文献^[19]提出社会中人与人之间的活动范围存在着一种相似性, 可通过地理位置的获得对其相似度进行比较。文献^[20]则提出中心性, 指出有的人比较受欢迎、具有较强的活动能力、社交活动频繁、具有更多与其他人接触的机会。

综上所述, 基于复制的转发网络负荷过大, 在节点缓存受限时消息递交率和延时性能急剧下降, 整体网络性能很低; 而基于效用的转发虽然降低了资源消耗, 但由于其单路径传输导致延时过大, 且在效用预测不准确的情况下还会降低消息递交率, Prophet 结合了两者的转发协议设计, 但仅以相遇概率来计算效用, 不够准确, 而且网络中的副本存在发散的可能。

2 基于移动特征的效用转发协议 (BMCU)

BMCU 协议以移动特征为基础, 运用信息熵理论以及移动范围自感知的方法分别对节点的活跃度和相似度进行建模计算, 通过对转发条件和副本控制的设计, 达到提高消息递交率、降低网络资源消耗的目的。

2.1 移动特征

在实际的应用场景中, 由于移动节点的载体为人、动物、车辆等, 这些载体因各自具有不同的角色, 活动范围、活动能力各不相同。以动物为例, 在一个小的群体内, 动物的生活习性几乎相同, 其移动范围也大致相似。此外, 有的动物比较活跃, 长期处于移动过程中, 接触其他动物较多, 而有的则比较懒惰, 只与少数的固定几个动物接触。本文以相似度和活跃度来表示节点的移动特征。

2.1.1 相似度模型建立

节点的相似度是指移动范围 (即地理位置) 的相似, 而得到精确的地理坐标需要配备相应的硬件设施 (如 GPS), 在没有其他硬件设施的条件下, 本文通过节点对移动范围的感知来计算节点在地理位置上移动的相似度。节点通过记录近期所遇到的邻居节点来感知自身的移动范围, 通过相遇节点信息来比较节点间移动范围的重叠程度。两个节点运动范围的相似性取决于它们共享信息的程度, 共享信息含量 (相同 ID 邻居节点的数目) 越大, 这两个节点运动范围越相似, 如式 (1) 所示, $|S_i|$ 表示 i 的邻居元素个数, $|S_i \cap S_j|$ 为 i 和 j 中共同的邻居元素个数。

$$\text{sim}_{ij} = \frac{|S_i \cap S_j|}{|S_i|} \quad (1)$$

2.1.2 活跃度模型建立

活跃度表示节点的活动能力, 活动能力越强, 能够接触的节点越多, 因此能够成功转发到目的节点的机会越大。本文将节点邻居集合的变化过程作为具有不确定性属性的信源, 即 ε 。基于信息熵理论对其进行度量, 信息熵值越大说明邻居表信息的不确定性越大, 即邻居表信息变化越剧烈, 因此可以认为该节点越活跃, 如式 (2) 所示。

$$\text{act} = Hw(\varepsilon) = - \sum_{i=1}^n CP_i \log_2 P_i \quad (2)$$

其中: $Hw(\varepsilon)$ 为信息熵值, C 为权值, P_i 为随机变量 ε 中每个不同事件的概率。信息熵是对某一事件不确定性程度的度量, $Hw(\varepsilon)$ 的值越大, 表现出该事件的不确定程度越大。具体过程如下:

a) 随机变量 S 的构建。以 Δt 为邻居表更新周期, 在固定时长 T 内, 得到 $T/\Delta t = N$ 个不同检测时刻邻居节点集合的有序序列 $ST(\varepsilon) = (\varepsilon_{t_1}, \varepsilon_{t_2}, \varepsilon_{t_3}, \dots, \varepsilon_{t_N})$ 。

b) 概率分布 p_m 的计算。将 $ST(\varepsilon)$ 中所有相同的 S_i ($1 \leq i \leq n$) 合并, 得出样本空间 $RT(\varepsilon) = (\varepsilon_{r_1}, \varepsilon_{r_2}, \varepsilon_{r_3}, \dots, \varepsilon_{r_K})$ ($1 \leq K \leq N$), 并由离散型随机变量概率分布的计算式得出 $P(\varepsilon_{r_i})$, 如式 (3) 所示, 其中, $|\varepsilon_{r_i}|$ 表示集合 ε_{r_i} 在取值空间 $ST(\varepsilon)$ 中的个数。

$$P(\varepsilon_{r_i}) = \frac{|\varepsilon_{r_i}|}{N} \quad (3)$$

c) 权重值的确定。熵权法中的权重值在各个不同的应用场景中的选取有所不同, 大多以经验值、专家值为准。本文提出一种动态的可变权重值 $Cm(S)$, 即对每个 ε_{r_i} 有不同的变化

权重,以自身邻居表变化率计算其值,如式(4)所示。 $C_i RT(\varepsilon)$ 表示节点在某个时刻相对上一时刻的邻居信息的变化,以此作为权重值。当 $i=1$ 时,此时由于是序列中第一次邻居表信息,因此没有变化,将 $C_i RT(\varepsilon)$ 的值设为0。 $|\varepsilon_{r_i} \cap \varepsilon_{r(i-1)}|$ 表示第 i 个时刻与 $i-1$ 时刻邻居表中相同的节点个数, $|\varepsilon_{r_i} \cup \varepsilon_{r(i-1)}|$ 则表示这两个时刻所遇到的总节点个数。

$$C_i(RT(\varepsilon)) = \begin{cases} 0 & i=1 \\ 1 - \frac{|\varepsilon_{r_i} \cap \varepsilon_{r(i-1)}|}{|\varepsilon_{r_i} \cup \varepsilon_{r(i-1)}|} & 2 \leq i \leq k \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)(4)得出节点活跃性的计算式如(5)所示。

$$act = - \sum_{m=1}^k \left(1 - \frac{|\varepsilon_{r_i} \cap \varepsilon_{r(i-1)}|}{|\varepsilon_{r_i} \cup \varepsilon_{r(i-1)}|}\right) \frac{|\varepsilon_{r_i}|}{|N|} \log_2 \frac{|\varepsilon_{r_i}|}{|N|} \quad (5)$$

2.2 消息转发条件

与传统基于效用的转发不同,在两个节点相遇时不只依靠效用值的大小来判定是否转发,而是首先比较它们的相似度 sim 。若两节点的相似度 $sim > \theta$ (阈值),则认为它们的移动范围基本相似,即两者能遇到的节点基本一致,因此直接不转发;若 $sim < \theta$ 则进入效用值比较阶段,当相遇节点的效用值较大时,消息携带节点把当前要转发的消息复制一份并转发,否则不转发。效用值的计算如式(6)所示,其中, β 为权重因子, E_i 为节点当前剩余能量。以活跃度和当前剩余能量来表示节点作为潜在中继的效用。

$$U_i = \beta act_i + (1 - \beta) E_i \quad (6)$$

2.3 副本控制

本文采取“多拷贝+控制”的原则来设计消息转发策略。增加消息的拷贝数量有利于提高传输成功率,而对消息拷贝数量和转发条件的合理控制有利于降低网络资源消耗。

a)多拷贝实现。活跃节点由于其活动能力强,所以能够遇到的节点多,其自身作为中继转发消息到目的节点的概率大。利用这一特点,本文通过活跃节点实现消息的多拷贝,即效用值较大的节点从消息携带节点处获得一份拷贝,通过这种方式适当增加消息的副本数,从而降低消息传输到目的节点的延时。

b)控制方案。基于效用的转发通过效用值的比较作为转发条件对消息的副本进行了控制,但副本数仍具有较大的发散性。本文在使用效用值对网络中的副本进行控制的同时,利用了节点的移动特征即相似度进一步抑制了网络中副本的发散性,避免了不必要的转发。当两个节点相遇时,若相似度较大,即使相遇节点的效用值大于消息携带节点,仍然不进行复制转发。

3 仿真及性能分析

3.1 仿真场景设置

本文以赫尔辛基理工大学网络实验室开发的机会网络环境ONE^[21]为仿真平台,地图大小为2000 m×2000 m。网络由200个节点组成,节点的缓存设为200 KB,网络中每隔5 s产生一个消息,消息的大小为2 KB,所有节点采用Random Way Point模式移动,节点平均移动速度为10 m/s,传递速度为250 kbps,节点通信半径设为20 m。相似度阈值 θ 取值过大会失去对副本的抑制作用,过小则会导致消息传递机会减少,因此仿真中 θ 的取值为0.5。效用值的加权计算中权重因子 β 取值0.5。 Δt 取值为50 s,每隔50 s得到一个邻居集合, T 的值设为500 s。通过增加网络运行时间从而增加网络负荷来观察

BMCU转发协议的性能,并与基于泛洪的传染路由Epidemic协议和基于概率转发的Prophet协议在以下四个方面进行比较:

a)消息递交率。目的节点成功接收到的消息数量与源节点产生的消息数量的比值。

b)平均端到端延时。指在成功投递的消息中,消息到达目的节点的时间与消息从源节点产生的时间差的平均值。

c)开销比。整个网络中复制转发的消息数量与目的节点接收到的消息数量的比值。

d)平均跳数。消息成功被目的节点接收平均需要经过几次转发。由于节点能耗主要集中在消息的转发上,因此平均跳数是能耗的一种体现。

3.2 仿真结果与性能分析

由图1可以看出,在1500 s之前Epidemic的递交率是最高的,这是因为由于节点缓存未受限,Epidemic采用扩散的方法使得消息迅速转发、成功传递;随着仿真时间的增大,网络中产生的消息越来越多,使得节点缓存受限,而Epidemic协议和Prophet协议在节点缓存受限的情况下,对缓存的竞争非常激烈,会导致大量消息被丢弃,进而引起消息的多次重传,所以传递成功率下降幅度较大。1500 s后BMCU的消息传递成功率高于Epidemic和Prophet。在1000 s时BMCU的传递成功率只有28%,这是因为仿真时间不够长,节点采集到的信息不全,使得两个移动特征的计算不准确从而影响到消息递交率。

由图2可以看出,在5000 s之前Epidemic的平均延时是较低的,这是因为Epidemic协议产生的副本数是最多的,通过盲目扩散消息副本数,使得消息能够迅速地转发,以较低的延时转发到目的节点。各个协议的平均延时都随仿真时间增大而增大,BMCU的延时增长速度是最缓慢的,逐渐趋于平稳,而Epidemic的增长幅度最大。

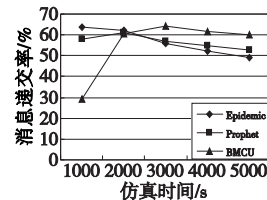


图1 消息递交率比较

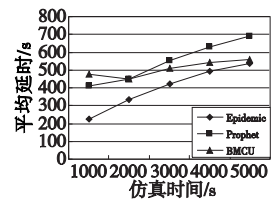


图2 平均延时比较

图3显示了BMCU在网络开销方面的明显优势。Epidemic由于其消息的传染性扩散,开销是最大的,在5000 s时网络中复制转发的消息数达到目的节点收到消息数的700倍,严重浪费了网络资源;而Prophet由于对与副本的发散缺乏抑制,开销也很大;BMCU在转发阶段,首先通过相似度的比较避免了消息的不必要转发;其次通过效用值的大小对副本复制进行了控制,其开销大约只有Epidemic的一半。

同理,BMCU的平均跳数是最小的。由图4可看出,在BMCU协议中成功传递一条消息到目的节点大约平均需要3跳,而Epidemic则需要5跳。在200个节点的情况下,每转发成功一跳消息,Epidemic产生的平均转发总次数要比BMCU多出400条左右,在不考虑接收消息和算法计算的能耗情况下,BMCU协议的能耗是最低的。

4 结束语

本文分析了目前机会网络中的主流转发协议的特点以及各自存在的问题,针对具体应用场景中节点的移动具有一定规律这一实际特点,提出了基于移动特征的效用转发协议。该协

议在消息转发阶段依靠活跃节点带动消息的多拷贝传输,通过对移动范围的比较,避免了消息的盲目转发,实现对副本的抑制。由仿真结果可以看出,BMCU 协议有效利用节点移动特征在转发过程中大大减少了消息的复制转发次数,提升了路由效率,降低了能耗,同时在保持相对平稳的端到端时延的情况下,提高了消息递交率。由于端到端的长延时导致数据在网络中停滞较长的时间,使得节点存储空间消耗较快,下一步将设计有效的缓存替换策略来缓解机会网络中缓存空间需求矛盾。

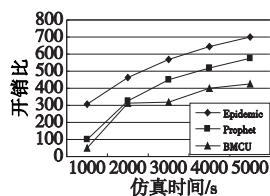


图3 开销比较

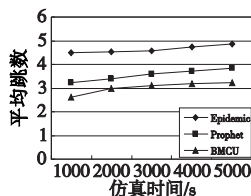


图4 平均跳数比较

参考文献:

- [1] PELUSI L, PASSARELLA A, CONTI M. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile Ad hoc networks[J]. *Communications Magazine*, 2006, 44(11): 134-141.
- [2] JUANG P, OKI H, WANG Y, et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet [J]. *ACM Operating Systems Review*, 2002, 36(5): 96-107.
- [3] SU Jing, SCOTT J, HUI Pan, et al. Huggle: seamless networking for mobile applications[C]//Proc of the 9th International Conference on Ubiquitous Computing. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 391-408.
- [4] CHEN Z D, KUNG H T, VLAH D. Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways[C]//Proc of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking. 2001: 247-250.
- [5] CUI J H, KONG J, GERLA M, et al. The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications[J]. *IEEE Network*, 2006, 20(3): 12-18.
- [6] 胡四泉, 汪红兵, 王俊峰. 机会型网络研究综述[J]. *计算机科学*, 2009, 36(10): 32-37.
- [7] 何靖桐. 稀疏 Ad hoc 网络中路由算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [8] FRENKIEL R H, BADRINATH B R, BORRES J, et al. The Infostations challenge: balancing cost and ubiquity in delivering wireless data [J]. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(2): 66-71.
- [9] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected Ad hoc networks, CS-2000-06[R]. [S. l.]: Duke University, 2000.
- [10] RAMANATHAN R, HANSEN R, BASU P, et al. Prioritized Epidemic routing for opportunistic networks[C]//Proc of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. New York: ACM Press, 2007: 62-66.
- [11] CARRERAS I, MIORANDI D, CHLAMTAC I. A framework for opportunistic forwarding in disconnected networks[C]//Proc of the 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services. 2006: 1-9.
- [12] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. *软件学报*, 2009, 20(1): 124-137.
- [13] JONES E P C, LI L, WARD P A S. Practical routing in delay-tolerant networks[C]//Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking. New York: ACM, 2005: 237-243.
- [14] MUSOLESI M, HAILES S, MASCOLO C. Adaptive routing for intermittently connected mobile Ad hoc networks[C]//Proc of the 6th IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. 2005: 183-189.
- [15] BOLDRINI C, CONTI M, IACOPINI I, et al. HiBOP: a history based routing protocol for opportunistic networks[C]//Proc of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. 2007: 1-12.
- [16] KOTILAINEN N P, KURHINEN J. A genetic-neural approach for mobility assisted routing in a mobile encounter network[C]//Proc of the 5th International Conference on Information Technology and Applications. 2008: 206-210.
- [17] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2003, 7(3): 19-20.
- [18] 周强, 应晶, 吴明晖. 基于特征分类的机会网络多因素预测路由[J]. *浙江大学学报*, 2010, 144(3): 414-419.
- [19] ZHENG Y, XIE X, MA W Y. GeoLife: a collaborative social networking service among user, location and trajectory[J]. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 2010, 33(2): 32-40.
- [20] HUI Pan, CROWCROFT J, YONEKI E. BUBBLE Rap: social-based forwarding in delay tolerant networks[C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2008: 241-250.
- [21] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]//Proc of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. Brussels: ICST, 2009.

(上接第 1485 页)表述网络收益,减少计算复杂度,以达到无线网络功率优化的目的。

参考文献:

- [1] GOODMAN D, MANDAYAM N. Power control for wireless data[J]. *IEEE Personal Communications*, 2007, 7(2): 48-54.
- [2] GOODMAN D, MANDAYAM N, SHAH V. A new framework for power control in wireless data network: game, utility, and pricing [C]//Proc of Wireless Multimedia Network Technologies. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 1999: 289-310.
- [3] GOODMAN D, MANDAYAM N. Network assisted power control for wireless data [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2001, 6(5): 409-415.
- [4] JI Hong-bin, HUANG Ching-yao. Non-cooperative uplink power control in cellular radio systems [J]. *Wireless Networks*, 2009, 4(3): 233-240.
- [5] CHEN Jing, LIAN Shi-guo, DU Rui-ying. A hybrid game model based on reputation for spectrum allocation in wireless networks[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(4): 1623-1631.
- [6] GRANDHI S, BIJAYAN R, GOODMAN D J. Distributed power control in cellular radio system[J]. *IEEE Trans on Communications*, 1994, 42(234): 226-228.
- [7] NOWAK M A, MAY R M. Evolutionary games and spatial chaos[J]. *NATURE*, 1992, 359: 826-829.
- [8] SZABO G, FATH G. Evolutionary games on graphs[J]. *Physics Reports*, 2007, 446(4): 97-216.
- [9] KOSKIE S, GAJIC Z. A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2005, 13(5): 1017-1026.
- [10] FOSCHINI G-J, MILJANIC Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 1993, 42(4): 641-646.
- [11] PANAOUSIS E, PLYZOS G. Power control using game theory in a shared open spectrum[C]//Proc of Wireless World Research Forum Meeting. 2009.