

无线传感器网络椭圆绕洞路由算法

梁小满^{1,2}, 王国军², 谢永明²

(1. 衡阳师范学院计算机科学系, 衡阳 421008; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 针对已有关于洞路由的文献没有给出由于减少数据包沿洞边界传送导致洞边界节点的能量过度消耗和数据碰撞, 以及避免局部最优现象的好方法的缺陷, 提出 HRAEM 算法, 根据数据源和目标出现在无线传感器网络中位置的不同采用不同的转发策略。仿真结果表明, 该算法优化了洞路由路径, 在数据包投递、平均延时和网络生命周期等方面具有良好的性能。

关键词: 无线传感器网络; 贪婪转发; 洞路由; 椭圆

Ellipse Hole-routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

LIANG Xiao-man^{1,2}, WANG Guo-jun², XIE Yong-ming²

(1. Dept. of Computer Science, Hengyang Normal University, Hengyang 421008;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

【Abstract】 Aiming at the defects that the existing paper didn't give a good method to reduce the energy consumption and data collisions of the nodes on the boundaries of holes because of packets traveling along the boundaries of hole, also to avoid the problem of local minimum phenomenon. The paper proposes the HRAEM algorithm, according to different locations of the source and destination appear in the wireless sensor networks using different forwarding strategies. Simulation results show that the algorithm optimizes routing path of the hole-routing and has a good performance on data packet delivery, average delay, and network life cycle.

【Key words】 wireless sensor networks; greedy forwarding; hole-routing; ellipse

1 概述

无线传感器网络通常是用飞机将大量传感器节点随机布撒到某个地区建立的, 这些传感器节点的能量有限且无法进行补充。因此, 没有布撒到传感器节点, 或因自然环境、火灾等灾难导致传感器节点毁坏, 或因能量消耗等原因导致传感器节点无法正常工作, 以致出现传感器节点不能实现通信的区域, 把这种区域称为洞。

目前已有许多研究提出解决洞路由问题的方法, 这些方法可归为: (1)扩大发射功率; (2)移动节点填补; (3)启发回避^[1-3]; (4)距离更新^[4]; (5)右手规则^[5-6]; (6)背压规则^[7]。很明显, 前2类在许多场合是行不通的; 第(3)类、第(4)类不适合移动基站、多路径或路由路径变化较快的情形; 而根据右手规则, 数据包被改为沿洞的边界转发; 根据背压规则, 数据包回退到上游节点, 再设法寻找一条发往目标位置的新路径。

对含有洞的传感器网络, 位于洞边界的节点通常比其他一般节点更易失效。其原因包括: 大多数的地理路由协议在路由数据包遇到洞时往往沿洞的边界路由^[5-7], 使得洞边界的节点充当路由器通信的概率可能比其他一般节点高, 这样洞边界节点的能量可能消耗过度, 以致将洞扩大。此外, 多路通信消息同时经过共同的洞边界节点的概率可能高于同时经过其他一般节点, 如图1所示, 这个洞边界的许多节点虽然不在数据源节点到基站之间的直线路径上, 但被3路通信消息共享, 从而在这些节点处可能经常发生数据碰撞。此外, 文献[5-7]没有很好地解决局部最优现象^[6]的洞问题, 即一个节点(如图2节点M)找不到比自身更接近目标位置的邻节点的问题。图2显示的是数据源节点S发送数据包越过一个洞到基站D的GSPR^[5]路由方式描述。虚线1表示数据的发送方向。当数

据包到达洞边界节点M时, 因为节点M找不到比自身更接近节点D的一跳邻节点, 所以出现了局部最优问题, 节点M被称为最佳主机。按照文献[5]中提出的右手规则, 数据包会沿洞的边界按曲线2标明的路径继续前行。很明显, 曲线2是从节点M到节点D的最短路径, 但把它与线段SM连接后便不是由节点S至节点D的最短路径。

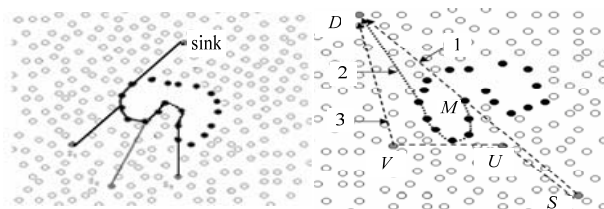


图1 多路通信经过同一个洞 图2 传感器网络洞问题描述

路径 $3S \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow D$ 为节点S至节点D的更为合理的路径。假定节点U知道该洞的信息, 为绕过洞, 数据包到达节点U便改变方向发往节点V。这条路径有如下优点: (1)如果节点U和节点V选择合适, 这条路径比文献[5-6]提出的路径要短。(2)由于数据包提前改变了方向, 因此不必在到达最佳主机后再去重新寻找路由, 从而可以减少在文献[7]中发生的路由开销。(3)这条道路不再沿洞的边界, 边界节点的能量消

基金项目: 国家“973”计划基金资助项目(2003CB3170); 湖南省科技厅基金资助项目(2006GK3010); 湖南省自然科学基金资助项目(2006GK3010)

作者简介: 梁小满(1965—), 男, 副教授、硕士, 主研方向: 计算机辅助教学与管理, 计算机网络; 王国军, 教授、博士、博士生导师; 谢永明, 博士研究生

收稿日期: 2009-01-30 **E-mail:** lxm9898@vip.sina.com

耗和数据碰撞的概率可以大大减少。

本文通过建立一个椭圆形洞模型^[8], 提出了 HRAEM 协议, 合理地解决了寻找上述合适路径需要解决的以下关键问题: (1) U 选在何处。(2) 往哪个方向绕洞。(3) 绕到距 U 多远的 V 再按贪婪转发将数据转发到目标位置。

2 相关概念

设 $PS = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 是一个平面点集, $P_i \in PS (i=1, 2, \dots, n)$ 是平面上的点, P_i 的坐标为 (x_i, y_i) , $x_i, y_i \in R$, $\overline{P_i P_j}$ 为连接 P_i 和 P_j 的线段。

定义 1 P_i 到 P_j 间的有向距离 $vdist(p_i, p_j) (i, j=1, 2, \dots, n)$ 为线段 $\overline{P_i P_j}$ 的长度 $dist(p_i, p_j)$ 带符号的值, P_i 在 P_j 左侧为正, 在 P_j 右侧为负, 2 点重合时为 0。

定义 2 $Diam(PS)$ 为点集 PS 的直径, 当且仅当 $Diam(PS) = \max_{i,j=1}^n \{dist(P_i, P_j)\}$ 。

定义 3 设行列式

$$D(P_i, P_j, P_k) = \begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \end{vmatrix}$$

其中, P_i, P_j, P_k 是一个左旋^[9], 当且仅当 $D(P_i, P_j, P_k) > 0$, 即 P_i, P_j, P_k, P_i 构成一个逆时针回路; P_i, P_j, P_k 是一个右旋, 当且仅当 $D(P_i, P_j, P_k) < 0$, 即 P_i, P_j, P_k, P_i 构成一个顺时针回路; P_i, P_j, P_k 3 点共线, 当且仅当 $D(P_i, P_j, P_k) = 0$ 。

定义 4 点 P_i 到线段 $\overline{P_j P_k}$ 的有向距离 $vdist(P_i, P_j, P_k)$ 为 P_i 到线段 $\overline{P_j P_k}$ 所在直线的带符号的距离值, 即:

$$vdist(P_i, P_j, P_k) = \frac{D(P_i, P_j, P_k)}{dist(P_j, P_k)}$$

3 洞模型的建立

图 3 显示构建洞模型的过程。如图 3(a)所示, 洞边界上的节点 B_0, B_1, \dots, B_n 的坐标已知, 它们通过文献[6]中提出的机制检测出自己位于洞的边界。设节点 B_0 开始检测到它位于洞的边界, 它启动一个标有其 ID 的洞边界检测包(HBD), 并将 HBD 数据包按右手规则沿洞的边界转发给节点 B_1 , 节点 B_1 便查找包中是否包含自己的位置信息, 若没有发现自己的信息, 便将其位置信息添加到收到的 HBD 包, 再按右手规则转交给节点 B_2 , 这一过程重复直至 HBD 数据包已绕洞一圈, 并最终由启动节点 B_0 收到, 此时停止接收上游节点发出的 HBD 数据包, 结束该轮洞发现过程。

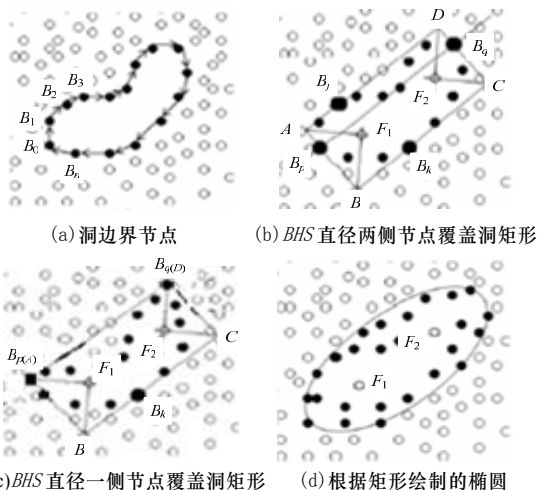


图 3 洞几何模型建立过程

节点 B_0 从收到的 HBD 包中得到了洞边界节点集 $HBS = \{B_0, B_1, \dots, B_n\}$ 中所有节点的位置信息后, 再计算出:

$$dist(B_p, B_q) = Diam(HBS)$$

$$B_j = \{T, vdist(B_p, B_q, T) = \max_{i=1}^n \{vdist(B_p, B_q, B_i)\}, T \in HBD\}$$

$$B_k = \{T, vdist(B_p, B_q, T) = \min_{i=1}^n \{vdist(B_p, B_q, B_i)\}, T \in HBD\}$$

过 B_p 作 $\overline{B_p B_q}$ 的垂线 AB , 在 B_p 两侧分别取点 A, B , 过 B_q 作 $\overline{B_p B_q}$ 的垂线 DC , 在 B_q 两侧分别取点 D, C , 使得

$$vdist(B_p, A) = vdist(B_q, D) = vdist(B_p, B_q, B_j)$$

$$vdist(B_p, B) = vdist(B_q, C) = vdist(B_p, B_q, B_k)$$

很明显 $vdist(B_p, B_q, B_j), vdist(B_p, B_q, B_k)$ 不全为 0, 所以, 节点 B_0 可以获得如图 3(b)和图 3(c)所示的矩形 $ABCD$, 其中, 图 3(c)中 A, D 分别与 B_p, B_q 重合。设矩形的 4 个直角的角平分线交于点 $F_1(x_1, y_1)$ 和 $F_2(x_2, y_2)$ 为椭圆的焦点, 椭圆的长轴的长是 $2a$, 则

$$dist(B_m, F_1) + dist(B_m, F_2) = \max_{i=1}^n \{dist(B_i, F_1) + dist(B_i, F_2)\} = 2a$$

根据椭圆定义, 椭圆方程为

$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} = 2a$$

这就得到了可以完全覆盖洞的椭圆, 然后, 节点 B_0 将所有有关椭圆信息纳入到一个椭圆分布(ED)包, 并将 ED 包广播给椭圆区域内所有节点, 让其知道图 3(d)所示的椭圆。

4 洞模型下的数据传输

4.1 算法描述

第 3 节描述了如何构造一个可完全覆盖洞的椭圆模型, 构造该椭圆的目的是防止目标位置不在椭圆区域的数据包靠近洞。下面是椭圆模型下的路由协议 HRAEM 的算法描述:

```

IF (S 有 ED 包)
IF (D 在 S 的椭圆内)
IF (D(S,O,D)>0)
沿  $\overline{SO}$  左侧在椭圆区域内按贪婪方式路由到 D;
ELSE
沿  $\overline{SO}$  右侧在椭圆区域内按贪婪方式路由到 D;
ELSE
{
IF (D(S,O,D)>0)
沿  $\overline{SO}$  左侧在椭圆区域内按贪婪方式路由到离 D 最近的椭圆边界的下一跳;
ELSE
沿  $\overline{SO}$  右侧在椭圆区域内按贪婪方式路由到离 D 最近的椭圆边界的下一跳;
按贪婪方式路由到 D; }
ELSE
{按贪婪方式路由到节点 U;
IF (U 节点有 ED 包)
IF (D 在 U 节点的椭圆内)
IF (D(U,O,D)>0)
沿  $\overline{UO}$  左侧在椭圆区域内按贪婪方式路由到 D;
ELSE
沿  $\overline{UO}$  右侧在椭圆区域内按贪婪方式路由到 D;
ELSE
{IF (U 为非代理模式)
{将 U 设为代理模式;
IF (D(U,O,D)>0)

```

沿椭圆在 U 处的切线切点左侧方向寻找与 D 最近代理位置 V ;
 ELSE
 沿椭圆在 U 处的切线切点右侧方向寻找与 D 最近代理位置 V ;
 在 V 处离 D 最近的节点修改为非代理模式, 代理位置为空, 再按贪婪方式路由到 D ;
 ELSE
 转发到备用代理, 再将模式修改为非代理模式, 代理位置为空, 再按贪婪方式路由到 D ;
 ELSE
 U 节点地理转发机制路由到 D ;

4.2 数据传输过程分析

图 4 给出了洞模型下的数据传输过程, 其中, 图 4(a)表示的是数据源在椭圆内的情形, 其他图形表示的是数据源和目标位置都在椭圆外的情形, 为方便画图, 图中隐去了其他节点的位置。且假设数据源的数据包中含有目标位置、ID、路由模式、代理和备用代理位置及网络服务等信息。数据源模式初值为非代理, 代理与备用代理位置初值为空。

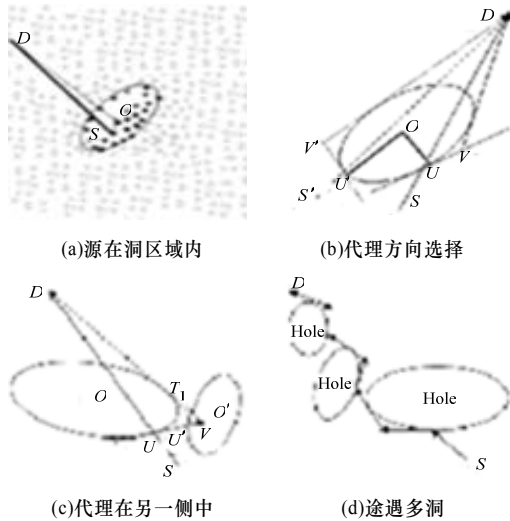


图 4 洞路由数据传输

在图 4(a)中, 由定义 3 可知 S, O, D 是一个左旋, 需要在椭圆内往 \overline{SO} 左侧绕洞出椭圆再按贪婪机制路由到 D 。

在图 4(b)中, S 按贪婪方式遇到 U 后, 这时, U 的模式不是代理, 需要将模式设为代理, 并将代理位置和备用代理分别设为 V 和 T_1 , V 的获得方法如下:

设过 D 点的椭圆的 2 条切线与椭圆分别切于 T_1, T_2 , 因为它们分别在 \overline{UD} 的两侧, 所以 $D(U, D, T_1)$ 和 $D(U, D, T_2)$ 必有一个与 $D(U, O, D)$ 符号相同。不妨设为 $D(U, D, T_1)$, 设直线 $D T_1$ 与椭圆过 U 点的切线交于 Q , 取 $L = \min\{\text{dist}(U, Q), a\}$ (a 是椭圆长半轴的长度) 为线段 \overline{UV} 的长, 根据 T_1 在 \overline{UD} 的那一侧, 便知 V 在 U 的那一侧。

根据定义 3 可知, U, O, D 是一个右旋, 若 V 不在另一洞区域中, 到达 V 附近节点后, 将模式设为非代理, 代理和备用代理重新设为空, 再按贪婪方式路由到 D 。

图 4(c)给出了节点 U 的代理位置位于另一个椭圆上的情形, 当另一椭圆 O' 上的节点 U' 收到来自 U 的数据包时, 由于它不能到达代理 V , 这时便启用备用代理 T_1 , 转发到 T_1 后将模式设为非代理, 代理和备用代理重设为空, 再按贪婪方式路由到 D 。

图 4(d)显示在数据源和目标位置之间存在多个洞的情况下算法是可行的。如果数据包从第 1 个代理位置到目标位置

时遇到另一个椭圆, 则该数据包启用备用代理, 在到达代理位置或备用代理位置时, 重置代理模式。重复这种过程, 直到数据包到达目标位置。

5 性能评价

5.1 仿真指标和仿真环境

所有传感器节点向基站发送完一次数据为一个周期, 当有效节点的数量所占比例开始低于某一门限值(本文设为 85%)时网络工作的周期数为网络寿命; 成功接收数据包的数量与传感器节点产生的数据包的数量之比为包投递率; 节点发送数据包和基站接收数据包之间的平均延迟时间叫平均延迟。现将 HRAEM 与 GPSR 和 SPEED^[1] 比较, 用这 3 个指标来评价洞模型的性能。

在 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 网络覆盖范围中, 手动设置 $400 \text{ m} \times 300 \text{ m}$, $300 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 和 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的 3 个矩形洞, 基站位于区域的中央, 在洞外区域随机分布 2 500 个节点。所有节点的通信半径为 150 m, 初始能量均匀分布在 $[2\ 500, 3\ 000]$ J 之间, 节点采集数据包为 512 Byte 的固定长度。在每个时刻有不同数目的节点同时向基站发送消息(即不同通信路数)。为了使结果更可靠, 取 100 次不同拓扑结构下用 C++ 仿真的平均值。

5.2 仿真结果

图 5 显示包投递率与通信路数的关系。

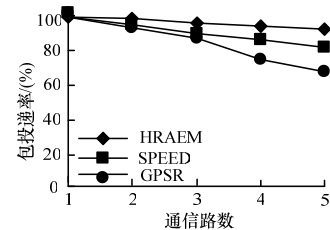


图 5 包投递率与通信路数的关系

当只有一路通信(每个时刻只有一个节点和基站通信)时, 3 种协议的包投递率几乎相同, 这是因为在模拟时间内几乎没有碰撞发生。由于 GPSR 和 SPEED 沿洞边界按右手规则转发数据包, 因此在洞周围的节点发生数据碰撞的概率随通信路数增多而增加。而在 HRAEM 中, 一旦遇到了同一个洞, 数据包会根据需要重定向到代理位置, 节点位置不同, 代理位置也不相同, 因而数据碰撞的概率并不随通信路数增多而显著增加。所以, 通信路数增多对 HRAEM 中的包投递率影响不明显。

图 6 显示平均延迟与通信路数的关系。只有一路通信时, 因为 SPEED 侧重于寻找数据传输速度高的路径, 所以它的平均延迟要低一些。然而, 超过 2 路通信时, SPEED 的平均延迟增加较为显著, 这是由于它在洞的边界发生碰撞后另找新的高速路径所致。而对于多路通信, 在寻找新路径的过程中又可能再次发生碰撞, 所以, 平均延迟随通信路数的增加而增加得更快。在 HRAEM 协议中, 由于洞模型设法避免数据碰撞在洞边界发生, 因此平均延迟并不随通信路数增加而显著增加。

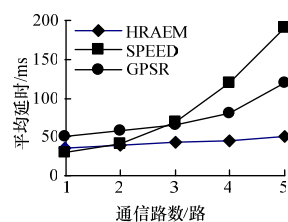


图 6 平均延时与通信路数的关系

图 7 显示网络的生命周期与通信路数的关系。数据包遇到洞时, GPSR 和 SPEED 利用右手规则路由数据包到基站, 因此, 洞边界节点的能源消耗相对较快。在 HRAEM 算法中, 数据包遇到了一个椭圆形时往往被重定向到代理位置, 不让数据包沿着洞的边界转发, 因此, 减少了洞边界节点的能源消耗。此外, 代理的位置与感知数据的节点和基站的位置密切相关, 即对于不同感知数据的节点和基站的位置, 洞附近数据传输路径不同, 因此, 均衡了洞附近节点的能源消耗。

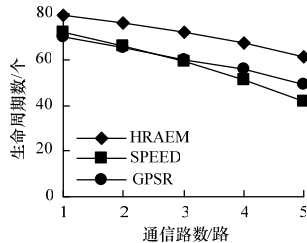


图 7 网络生命周期与通信路数的关系

6 结束语

本文提出的 HRAEM 算法, 运用数据包发送位置、洞区域中心位置和目标位置 3 点的关系优化了路由路径, 阻止了数据包进入最佳主机位置, 同时也减少了洞边界节点的能源消耗和数据碰撞, 较合理地解决了无线传感器网络中的洞路由问题。下一步工作将综合考虑本文忽视的节点到基站的距离和节点的剩余能量问题, 更合理地选择下一跳路由节点, 以避免网络中某些关键节点能量消耗过大, 使各节点消耗的能量尽可能均匀, 从而进一步延长传感器网络的生命期。

参考文献

[1] He Tian, Stankovic J A, Lu Chenyang, et al. SPEED: A Stateless Protocol for Real-time Communication in Sensor Networks[C]//Proc.

of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems. Providence, RI, USA: [s. n.], 2003: 46-55.

- [2] 王国军, 王田, 贾维嘉. 无线传感器网络中一种基于行进启发的地理位置路由[J]. 传感技术学报, 2007, (2): 382-386.
- [3] 江有福, 吴伟志. 一种基于地理位置的启发式 Ad Hoc 路由协议[J]. 计算机工程, 2008, 34(1): 137-139.
- [4] Chen Shigang, Fan Guangbin, Cui Junhong. Avoid Void in Geographic Routing for Data Aggregation in Sensor Networks[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2006, 1(4): 169-178.
- [5] Karp B, Kung H. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks[C]//Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, USA: ACM Press, 2000: 243-254.
- [6] Fang Qing, Gao Jie, Guibas L. Locating and Bypassing Routing Holes in Sensor Networks[C]//Proc. of the 23rd Conference of the IEEE Communications Society. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 2458-2468.
- [7] He Tian, Stankovic J A, Lu Chenyang, et al. A Spatiotemporal Communication Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2005, 16(10): 995-1006.
- [8] Yu F, Lee E, Chol Y, et al. A Modeling for Hole Problem in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 2007 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing. Honolulu, Hawaii, USA: [s. n.], 2007: 370-375.
- [9] Alsuwaiyel M. 算法设计技巧与分析[M]. 吴伟昶, 方世昌, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.

编辑 索书志

(上接第 77 页)

3.2 费用优化算法的实验结果

图 4 是竞争机制算法与费用优化算法在完成相同任务量时所用费用的比较。从图 5 可以看出, 采用费用优化算法, 用户的资源利用率好于竞价算法。

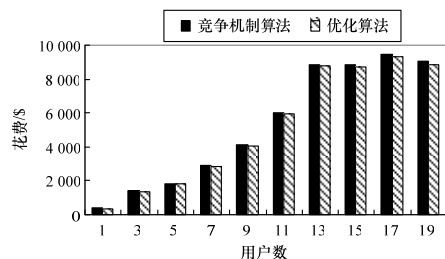


图 4 完成作业花费对比

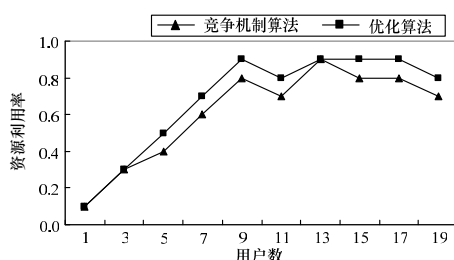


图 5 资源利用率对比

4 结束语

竞争机制提供了最优的资源配置, 是最理想和最简单的经济模型。竞争不但没有损害用户的效用, 反而提高了资源的配置效率及资源提供者的利益。基于竞争机制的费用优化算法不但对用户费用进行了优化, 而且资源的利用率得到显著提高。随着研究的深入, 进一步的工作包括构造更加有效的竞价函数及进行理论分析等。

参考文献

- [1] Buyya R, Abramson D, Venugopal S. The Grid Economy[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(3): 698-714.
- [2] de Assuncao M D, Buyya R. A Resource Exchange Mechanism for Peak Load Management in InterGrid Environments[R]. Grid Computing and Distributed Systems Laboratory, The University of Melbourne, Technical Report: GRIDS-TR-2007-18, 2007.
- [3] Irwin D, Chase J, Grit L, et al. Self-recharging Virtual Currency[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Economics of Peer-To-Peer System. New York, NY, USA: ACM Press, 2005: 93-98.
- [4] 胡志刚, 高明明. 基于市场经济的多目标网格资源分配方法[J]. 计算机工程, 2005, 31(18): 62-64.
- [5] Debreu G. Theory of Value[M]. [S. l.]: Yale University Press, 1959.

编辑 张 帆