

传感器网络中基于簇的多路径路由协议

马明 徐保国

(江南大学物联网工程学院 无锡 214122)

摘要 针对事件驱动型传感器网络的应用,提出一种基于簇的多路径路由协议 CBMRP(Cluster-Based Multi-path Routing Protocol),以平衡节点能耗和提高能量效率。根据应用特点,位于事件区域的节点根据邻居节点的分布情况和自身的剩余能量进行簇首竞争;然后,利用蚁群算法有效搜索多路径,并动态地选择一条路径传输数据。此外,该协议还采用一种简单的簇内调度方法,使其在满足监测精度的情况下,通过关闭冗余节点来进一步降低网络能耗。仿真结果表明,与传统协议相比,该协议具有更低的能耗和更长的网络生存期。

关键词 无线传感器网络,簇,多路径,蚁群算法

中图分类号 TP212.9,TP393 **文献标识码** A

Cluster-based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

MA Ming XU Bao-guo

(College of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract A cluster-based multipath routing protocol (CBMRP) was proposed, which is used for data gathering in a kind of event-driven sensor networks. Firstly, the nodes in the event area compete for becoming a clusterhead according to the distribution of their neighbors and residual energy. Secondly, the CBMRP utilizes ant colony algorithm to search for multiple paths, and presents a load balancing function to distribute the traffic along the multiple paths discovered. The simulation results show that CBMRP can balance the load of the network, reduce the energy consumption of nodes and prolong the network lifetime.

Keywords Wireless sensor networks, Cluster, Multipath, Ant colony algorithm

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)中节点能量有限,因为数据传输是最耗能的工作之一^[1],所以必须设计能量高效的路由协议。节点进行数据传输时,可以采用平面路由协议或层次路由协议^[2]。在平面路由协议中,为了平衡网络能耗、减少拥塞,很多研究采用多路径来传输数据^[3-6],但是,平面路由协议在节点数较多时,路由开销很大,可扩展性不佳。层次路由协议可通过在簇首执行数据融合来减少网络中的通信量^[8-11],所以能有效地降低通信能耗和延长网络生存期。

现有多路径传输方式主要分为主/从模式和复制模式^[3]。主/从模式中在主路径失效以后才启用从路径进行数据传输,这容易造成主路径上的节点能量被很快耗尽。复制模式在所有路径同时传输多个数据副本,在提高接收可靠性的同时也带来了更多的能耗。文献[4]对文献[3]中的路由协议进行了改进,通过扩大可选择节点范围获得了更长的网络生存期。文献[5,6]将蚁群算法^[7]应用于寻找在源接点和基站之间的多路径,提高了网络的可靠性,延长了网络生存期。

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[8]

协议是最先用于 WSNs 的基于簇的分布式自组织协议,该协议通过动态地分簇及在簇首执行数据融合来延长网络生存期。文献[9]对文献[8]中的算法进行了改进,通过在簇内构建链获得了更长的网络生存期。文献[10]提出一种反应式路由 TEEN,其通过设置软、硬门限降低了节点的能耗。文献[11]提出一种静态分簇协议 EACBR,其通过配置一些高端节点,由高端节点计算簇内的最短路径树,降低了数据传输的能耗。

上述算法虽然为后来的研究者解决数据传输的高能效问题提供了有益的支撑,但应用于事件驱动型传感器网络时仍存在不足:1)没有充分利用相邻节点监测数据的相关性,原始数据被直接传输至 sink 节点^[3-6];2)虽然文献[8-11]采用了分簇结构,但由于分簇与事件发生区域无关,将导致网络存在多余的传输能耗。

因此,针对事件驱动型传感器网络中数据收集的应用,综合层次路由协议和多路径路由协议的优点,提出一种基于簇的多路径路由协议 CBMRP (Cluster-Based Multi-path Routing Protocol)。它的目的是通过采用层次结构将节点聚成簇,并将簇首的融合结果通过多路径传输至基站,因此能高效地平衡节点能耗并延长网络生存期。同时,考虑到传感器网

到稿日期:2012-05-07 返修日期:2012-08-12

马明(1987-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感网络、智能家居、模式识别,E-mail:maming101010@126.com;徐保国(1951-),男,教授,主要研究方向为无线传感网络、算法优化、计算机系统。

簇中节点部署时密度高的特点,该协议采用了一种简单的簇内节点的调度方法,在满足监测精度要求的情况下,通过关闭冗余节点进一步节省节点的能量。

2 系统模型

CBMRP 假设节点随机均匀分布在一个 $M \times M$ 的正方形区域中,并具有下面的性质:

- 节点具有唯一标识(ID);
- 节点部署后不再移动,且不需要装备 GPS 等设备来获取地理位置;
- 节点可以根据接收信号强度估计相互间的距离;
- 节点可以根据与邻居节点的距离调节发射功率;
- 所有节点具有相同的计算能力和通信能力。

本文采用与文献[8]相同的通信模型,节点收、发数据的能耗通过式(1)、式(2)计算:

$$E_T(i, j) = k \times (E_{dec} + E_{amp} \times d_{i,j}^\alpha) \quad (1)$$

$$E_R(i, j) = k \times E_{dec} \quad (2)$$

式中, k 是数据长度, $E_T(i, j)$, $E_R(i, j)$ 分别表示节点 i 和节点 j 间的传输能耗和接收能耗。 $d_{i,j}$ 是节点 i 和节点 j 间的欧氏距离。 α 是距离参数, 节点间距离近, $\alpha = 2$; 否则, $\alpha = 4$ 。

3 CBMRP 协议描述

3.1 簇首竞争

在 CBMRP 协议中,只有位于事件区域的节点才能参与簇首竞争。一个节点竞争簇首,剩余能量应该满足:

$$E_i > 2 \times E_{dec} \times N_i \times k + E_{amp} \times k \times d_{max}^2 + E_{fusion} \times k \times N_i \quad (3)$$

式中, N_i 是邻居节点数; d_{max} 是节点最大通信距离; E_{fusion} 是执行数据融合的能耗。

发送簇头申明消息的时刻为:

$$t_i = k_1 \times T \times \frac{1}{P_{CH}^i} \quad (4)$$

式中, $k_1 \in (0, 1]$, T 是事先规定的簇头选择算法的持续时间, P_{CH}^i 由式(5)确定:

$$P_{CH}^i = (F_i)^{k_2} \times \left(\frac{E_i}{E_{mi}}\right)^{k_3} \times e^{-k_4 d_{i,Event}} \quad (5)$$

式中, $F_i = \sum_{j=1}^{N_i} f_{ij}$ 是节点 i 与所有邻居节点的相关度函数, f_{ij} 是节点 i 与节点 j 的相关度函数; E_i 是节点 i 当前剩余能量, E_{mi} 是节点 i 初始能量; k_2, k_3, k_4 是控制参数; $d_{i,Event}$ 表示到事件中心的距离。两个相邻传感器间的相关度函数 f_{ij} 为:

$$f_{ij} = \begin{cases} e^{-k_5 d_{i,j}}, & d_{i,j} \leq R \\ 0, & d_{i,j} > R \end{cases} \quad (6)$$

式中, R 是节点的通信半径 ($R > 0$)。

在 CBMRP 中,节点 i 如果在时刻 t_i 前没有收到任何邻居节点发出的簇头竞争消息,则向邻居节点广播竞争消息。节点 i 如果在 t_i 时刻前已收到邻居广播的竞争消息,则放弃簇头竞争。

3.2 确定活动节点

求解活动节点数可用下面的问题进行描述:在置信度为某个值的条件下,需要从总体(簇内所有节点)中抽取多少样本(活动节点数)才能保证测量值与总体平均值的偏差满足一定要求。一般情况下,节点的测量值 X 服从正态分布,所以可令全体传感器节点测量值的均值和方差分别为 μ 和 σ^2 。样

本均值为 $\hat{\mu} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i$, 其中, n_1 是样本数, μ 为样本均值, 允许误差 $\Delta = |\mu - \hat{\mu}|$; $\Delta = z_{\frac{\alpha}{2}} \times \sigma / \sqrt{n_1}$, 其中 z 是标准正态分布, 则:

$$n_1 = \left(\frac{z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma}{\Delta}\right)^2 \quad (7)$$

式中, n_1 即簇内的活动节点数量。

求活动节点类似于求解簇内的最小支配集,可采用下面的算法求解最小支配集:设 Q 是需要求出的支配集,则 Q 初始化为空集。根据下式确定簇内剩余节点中哪个节点加入支配集:

$$S_i = (E_i)^{k_5} \times (N_i)^{k_6} \quad (8)$$

式中, N_i 为节点 i 控制半径 r_c ($r_c \approx R_c / n_1$, R_c 是簇半径)内的节点数; k_5, k_6 是权值系数。算法选择 S_i 最大的一个节点加入集合 Q ,并将该节点及邻居节点从节点集合 N 中删除。然后再重新计算 N 中剩余节点的 S_i 值,如此重复,直至集合 N 变为空集,集合 Q 就是所求的支配集。

3.3 路径查找

搜索簇首到 sink 节点间满足能耗、负载平衡等性能指标的传输路径是多目标优化问题,该问题属于 NP 完全问题,文中用蚁群算法求解该问题。在 CBMRP 中,有 3 种类型的人工蚂蚁:搜索蚂蚁、确认蚂蚁和变异蚂蚁。搜索蚂蚁的功能是试探搜索簇首节点至基站的多路径;确认蚂蚁的功能是更新搜索到的路径的信息,同时返回已搜索路径的相关信息;变异蚂蚁随机选择一个邻居节点作为下一跳节点,用于部分克服算法早熟现象。

采用如下的蚁群算法模型:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^k(t) \times \eta_{ij}^k(t)}{\sum_k \tau_{ij}^k(t) \times \eta_{ij}^k(t)}, & \forall j \in N_i \text{ and } j \notin M^k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\eta_{ij}(t)$ 是节点 i 与 j 间的启发式因子。

$$\eta_{ij}(t) = (E_j)^{k_8} \times (d_{i,j})^{-k_9} \times (d_{j-sink})^{-k_{10}} \quad (10)$$

式中, k_8, k_9, k_{10} 是控制参数。

信息素更新采用局部更新和全局更新的方式:

$$\tau_{ij}(t, t+1) = \max\{\tau_{min}, \min\{\tau_{max}, (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \rho \times \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1)\}\} \quad (11)$$

式中, τ_{min}, τ_{max} 分别是每条路径上信息素的下限和上限。

信息素局部更新时采用下面的规则:

$$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) = \lambda / (N_i \times L_{CH-sink}) \quad (12)$$

式中, λ 是控制参数, $L_{CH-sink}$ 是簇首节点到 sink 节点的距离。

信息素全局更新时采用下面的规则:

$$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) = c_0 \frac{f_1^{k_{10}}(t)}{f_2^{k_{11}}(t) f_3^{k_{12}}(t)} \quad (13)$$

式中, $f_1(t) = \min_{i \in (n_1, n_2, \dots, n_m)} (E_i)$, $f_2(t) = \sum_{(i,j) \subset p} E_{ij}$, $f_3(t) = \sum_{(i,j) \subset p} (i, j)$ 。

路径查找的具体过程如下:

Step1 搜索蚂蚁从簇首节点出发,根据式(9)式(12)选择下一跳节点并更新经过路径的信息;搜索蚂蚁的结构为 ($Message_Type, SrID, FID, TTL, k, PID, L_k, ME_k, EC_k$), 其中, $Message_Type$ 表示分组的类型, $SrID$ 表示分组的源节点的 ID, FID 是下一跳节点 ID, TTL 是分组的存活时间(跳数), k 表示蚂蚁编号, PID 是前一跳节点, L_k 表示已经过路径的长度, ME_k 表示已经过节点的最少剩余能量, EC_k 表示

已经过路径的总能耗。

Step2 当中间节点收到一只搜索蚂蚁时,先检查 FID,如果与自己的 ID 不同,则丢弃该分组。否则,检查 TTL 字段,如果为零,则丢弃该分组;若不为零,则进一步检查是否收到过这只蚂蚁,如果收到过,则立即丢弃,同时向前一跳节点发送错误消息;否则,创建一个表项记录该蚂蚁的信息。然后使用函数 Random()产生一个(0,1)间的随机数 x ,如果 $x < 0.05$,则产生一只变异蚂蚁,随机选择一个邻居节点作为下一跳节点;若 $x > 0.05$,则根据式(9)~式(12)选择下一跳节点。在更新了 FID、TTL 和 PID 后,该蚂蚁被传输至下一跳节点。

Step3 sink 节点按搜索蚂蚁到达的先后顺序发送确认蚂蚁,确认蚂蚁按原路返回,同时使用式(11)、式(13)更新路径上的信息素。确认蚂蚁的结构为(Message_Type, FID, k , L_k , PH_{min} , PH),其中 PH_{min} 是信息素最少的一条边的信息素值,PH 是已经过路径的总信息素值。

3.4 路径选择

在所有人工蚂蚁满足搜索结束条件并返回簇首节点后,簇首节点根据人工蚂蚁携带的路径信息计算每条路径的性能:

$$M_i = C_1 \times PH_{min}(i) + C_2 \times PH \quad (14)$$

式中, C_1 、 C_2 为权重系数, $C_1 + C_2 = 1$ 。

令 P_i 是第 i 条路径的发送概率,则:

$$P_i = M_i / \sum_{j=1}^k M_j \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (15)$$

簇首节点根据每条路径的发送概率动态选择一条路径传输数据。

4 仿真及结果分析

采用 VC++6.0 来编程实现 CBMRP、IMP-EA^[4]、MACS^[6] 和 ECR^[9],并对其进行性能对比。

仿真区域为 200m×200m。采用文献[12]的事件半径模型。 $E_{det} = 50\text{nJ/bit}$, $E_{amp} = 10\text{pJ/bit/m}^2$, $E_{fusion} = 5\text{nJ/bit}$ 。 $\alpha = 2$, $\beta = 2$, $\rho = 0.2$, $\lambda = 20$ 。 $R = 40\text{m}$,数据包为 512Bytes,控制消息为 20Bytes。设采用的传感器测量值的方差 $\sigma = 0.1$,置信度为 95%。每类实验场景随机设置,为保证结果的通用性,每类实验随机进行 20 次,取它们的均值。其中 CBMRP 协议分为 CBMRP-1 和 CBMRP-2(使用簇内节点调度)。

4.1 能耗比较

研究对比几种算法在不同网络规模或不同事件半径下单次数据传输的能耗。场景 1:节点数 600~1000,监测精度为 95%,事件半径为 20m。场景 2:节点数 600,事件半径为 5m~30m。实验结果如图 1 所示。

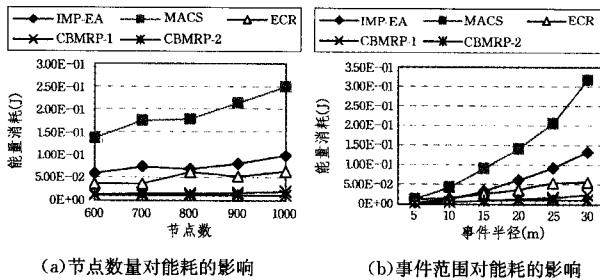


图 1 能耗比较

从图 1 可知,在两种场景下,CBMRP 的能耗都是最小的。这是因为 CBMRP 仅需要位于事件区域的节点参与分

簇,事件区域中的节点因为都在同一个簇中,所以具有较高的数据融合效率;同时,CBMRP 利用蚁群算法寻找多条传输路径时,考虑了能耗等因素,保证了数据能沿最优和次优路径传输,所以传输能耗较低。尽管 IMP-EA 和 MACS 可通过多路径传输方式来平衡网内能耗,但是它们属于平面路由协议,需要将较多的原始数据传输至 sink 节点再进行处理,造成了中间节点较多的能耗,因此总的传输能耗较高。虽然 ECR 也采用了分簇的结构,但其分簇与事件区域无关,导致数据融合效率不高,所以能耗比 CBMRP 高,但低于 IMP-EA 和 MACS。

4.2 网络生存期

网络生存期:从仿真开始到第一个节点失效的时间。本实验考查不同网络规模对各算法网络生存期的影响,以及各算法处理能量异构的能力。部署的节点数量为 600~1000,事件半径为 20m,节点初始能量考虑同构(2J)和异构(初始能量在 1J~2J 之间随机取值)两种情况。实验结果如图 2 所示。

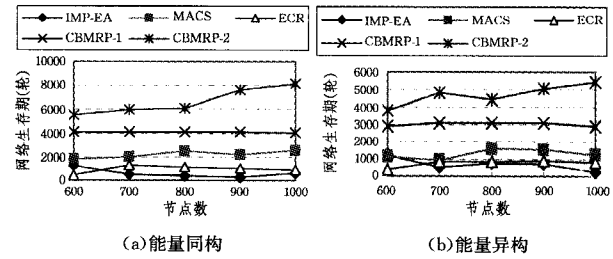


图 2 网络生存期

由图 2(a)可知,当网络规模变大时(节点密度增加),除了 CDMRP-2 的网络生存期随之增加外,别的几种协议不能有效地延长网络生存期。这是因为 CDMRP-2 采用了簇内调度算法,在满足测量精度的情况下,可以通过关闭冗余节点实现节能。因此簇内节点冗余度越高,CDMRP-2 的网络生存期越长。图 2(b)表明,即使在能量异构的场景中,CDMRP 的性能仍然优于其他 3 种算法,这是因为 CDMRP 在簇首选择和构建数据传输链路时都考虑了节点能量的影响,因此具有更好的处理能量异构的能力。因为工作节点数与测量精度要求有关,所以需要根据不同的应用要求,实现在监测精度与网络生存期之间的折中。

结束语 针对事件监测等应用,本文提出了一种分布式的基于簇的多路径路由协议 CBMRP。协议中节点根据相关性和剩余能量竞争簇首;利用蚁群算法寻找簇首至 sink 节点的不相交多路径,并通过人工蚂蚁的返回信息动态选择路径传输数据,有效地平衡了网络能耗。此外,该协议在满足监测精度的情况下通过控制活动节点数进一步降低了能耗。仿真结果表明,CBMRP 能降低节点的能耗,具有好的负载平衡能力和更长的网络生存期,适用于事件驱动型传感器网络。

参考文献

- [1] Estrin D. Wireless Sensor Networks Tutorial Part IV: Sensor Network Protocols[C]//Mobicom. USA, 2002: 23-28
- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005
- [3] Hong X, Gerla M, Hanbiao W, et al. Load balanced, energy-aware communications for Mars Sensor networks [C]//Proc. of Aerospace Conference. 2002: 1109-1115
- [4] 汪泉弟,李彬,刘青松. 无线传感器网络能量多路径路由研究

[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 129-134

[5] Okdem S, Karaboga D. Routing in wireless sensor networks using ant colony optimization [C]//First NASE/ESA Conference on Adaptive Hardware and System-AHS, 2006: 401-404

[6] 任秀丽, 梁红伟, 汪宇. 基于多路径蚁群算法的无线传感器网络的路由[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 116-118

[7] Dorigo M, Stützle T. Ant Colony Optimization[M]. MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2004

[8] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1: 660-670

[9] Tian Y, Wang Y, Zhang S. A novel chain-cluster based routing

protocol for wireless sensor networks [C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007: 2456-2459

[10] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]//15th International Parallel and Distributed Symposium. San Francisco, CA, USA, 2001: 2009-2015

[11] Dai Z, Li Z, Wang B, et al. An Energy-Aware Cluster-Based Routing Protocol for Wireless Sensor and Actor Network [J]. Information Technology, 2009, 8(7): 1044-1048

[12] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks [C]//Proc. of the IEEE Infocom. 2002: 2-14

(上接第 60 页)

```

}
else/* X 是全局频繁项集 */
{ GFS=GFSU{X}; /* 在全局频繁项集 GFS 中加入 k-项集 X */
  Sink deletes 项集 X 及其所有非空子集 from GFCS; /* 从全局频繁项集候选集 GFCS 中把项集 X 和它的所有非空子集全部删除 */
}
}
}

```

4 算法实现与性能分析

本文算法 FIMDS 和对比算法 PLT-STREAM^[9]是在一台台式机上用 VC++ 编程实现的, 无线传感器网络环境的模拟通过多线程进行, 实验数据来自 Intel Berkeley Research lab^[10]中的 10 天历史数据。运行算法的台式机配置如下: CPU 为 Intel Pentium IV 3.0GHz, 内存为 2GB DDR2, 操作系统为 Windows XP。

图 2 和图 3 是在不同的支持度下两个算法运行 10 天的数据时所占用的 CPU 时间和内存的比较。从图中看到, 算法 FIMDS 运行时间较快, 占用内存空间较少。由于 PLT-STREAM 算法扫描数据库两次, 而算法 FIMDS 只扫描一次, 因此极大地缩减了 CPU 的运行时间和内存的使用量。

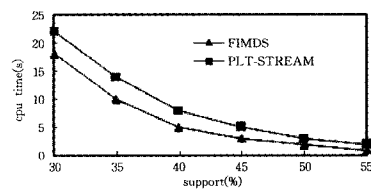


图 2 运行时间对比

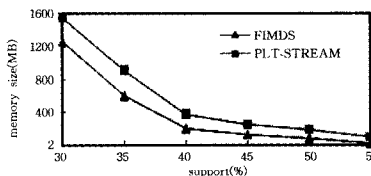


图 3 内存使用对比

图 4 说明两种算法在无线传感器网络中的传输通信量在刚开始阶段都随着传感器节点中数据流量的增大而增大。不过算法 FIMDS 的传输通信量增长相对缓慢, 特别是随着数据流量增大到一定程度, 该算法逐渐找出频繁项集后, 就再也不会再在传感器网络中传输非全局频繁项集的超集, 使得通信量趋于稳定, 而算法 PLT-STREAM 对于已经挖掘出的全局频繁项集的子集仍然还在传感器网络中传输, 不能有效缩减项目集的传输数, 随着数据流量的增大, 通信量大大高于算法

FIMDS。

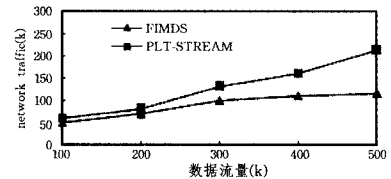


图 4 网络传输通信量对比

结束语 本文提出能快速挖掘出无线传感器网络中分布式数据流的频繁项集的算法 FIMDS。该算法采用的存储结构是频繁模式树, 项目集的频度能迅速地从各局部频繁模式树 FP-tree 的有关路径中获得, 对高速到达的数据流只需扫描一遍数据库, 使用自顶向下的剪枝策略能有效地减少全局频繁候选项集的生成和传输, 网络通信消耗得到降低, 运行效率较高。

参考文献

[1] Agrawal R, ImielinSki T, Swami A. Mining association rules between sets of items in large database [C]//The ACM SIGMOD International Conf on Management of Data, Washington, DC, 1993: 207-216

[2] 蔡伟贤, 滕少华. 改进的 Apriori_TFP 算法入侵检测中的应用 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(11): 3594-3598

[3] 刘维晓, 陈俊丽, 屈世富, 等. 一种改进的 Apriori 算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(11): 149-151

[4] 张浩, 景凤宣, 谢晓尧. 基于数据挖掘关联规则 Apriori 改进算法的入侵检测系统的研究 [J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2011, 29(3): 84-87

[5] 何波, 王华秋, 刘贞. 快速挖掘频繁项集的并行算法 [J]. 计算机应用, 2006, 26(2): 391-392

[6] 陆介平, 杨明, 孙志辉. 快速挖掘全局最大频繁项目集 [J]. 软件学报, 2005, 16(4): 553-560

[7] Han J W, Pei J, Yin Y. Mining frequent patterns without candidate generation [C]//Proc of the 2000 ACM SIGMOD Int Conf on Management of Data, Dallas; ACM Press, 2000: 1-12

[8] 杨明, 孙志辉, 吉根林. 快速挖掘全局频繁项目集 [J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(4): 620-626

[9] 梅淑英, 林亚平, 周四望, 等. 一种基于字典树的传感器节点关联规则的挖掘算法 [J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 119-124

[10] Intel Lab Data [EB/OL]. <http://berkeley.intel-research.net/labdata/>, 2008-08-30

[11] 王茜, 张鲲鹏. 隐私保护数据挖掘算法 MASK 的改进 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2012, 26(6): 63-66