

无线传感器 SMAC 协议的自适应占空比调整机制研究

李 跃 蒋文贤

(华侨大学计算机科学与技术学院 厦门 361021)

摘 要 针对无线传感器 SMAC 协议无法适应网络负载的动态变化而导致网络丢包和时延抖动情况,设计了 D-SMAC 协议。该协议依据数据包在发送队列中等待时间的平均值来预测当前网络的负载情况,并动态地调整节点的占空比,从而在实现能量有效利用的同时保证数据的及时可靠传输。仿真实验表明,改进后的协议能有效地利用了节点能量,同时增加了网络吞吐量,降低了数据端到端的时延。

关键词 无线传感器网络,SMAC,流量自适应,NS2

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

SMAC Protocol for Wireless Sensor Adjustment Mechanism of the Adaptive Duty Cycle

LI Yue JIANG Wen-xian

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract SMAC protocol for wireless sensor network can not adapt to dynamic changes in load, leading to network packet loss and delay jitter, so D-SMAC protocol was designed to solve these problems. Based on packets in the queue waiting time on average the protocol predicts the current network load conditions and dynamically adjusts the duty cycle of nodes, thus achieving efficient use of energy, while ensuring timely and reliable data transmission. The simulation results show that the improved protocol can effectively use the energy of nodes, ensure the network throughput, lower latency in end-to-end transmission.

Keywords Wireless sensor networks, SMAC, Traffic-adaptive, NS2

1 引言

由于节点监测环境的特殊性,无线传感器 MAC 协议的设计就必须将能量的合理消耗作为首要目标。因此,现存的无线 MAC 协议,比如蓝牙技术^[1]或 802.11MAC^[2]协议,都不能直接地应用到无线传感器网络中,因为它们都不是以能量有效利用为目的。

到目前为止,无线传感器 MAC 协议的研究仍为无线传感器网的一个热点。为适应无线传感器网络的特点,许多学者提出了大量有价值的研究成果。

B-MAC^[3]协议使用扩展前导和低功率侦听(LPL)技术实现低功耗通信,采用空闲信道评估技术进行信道裁决。节点在发送数据分组之前先发送一段长度固定的前导序列。为避免分组空传,前导序列长度要大于接收方睡眠时间。若节点唤醒后侦听到前导序列,则保持活跃状态,直到接收到数据分组或信道变得再次空闲为止。B-SMAC 虽然在吞吐量和时延方面表现较好,但是较长的固定前导序列造成发送方和接收方能耗增加、发送方邻居节点串音。

TRAMA^[4]协议是基于能量的,它用两种技术来节能:用基于流量的传输调度表来避免可能在接收者发生的数据包冲突;使节点在无接收要求时进入低能耗模式。TRAMA 将时

间分成时隙,按照一定的规则选出能量最低的节点。为其分配时隙。在此时隙内,节点可以工作或睡眠。当某一节点携带的能量比选举出的节点具有的能量低时,它进入选举阶段。如此反复,各节点间的能量将会得到有效平衡,从而延长了网络的生存期。

Z-MAC^[5]协议将信道使用物化为时间帧的同时,使用 CSMA^[6]作为基本机制。时隙的占有者只有数据发送的优先权,其他节点也可以在该时隙发送信息帧,当节点之间产生碰撞之后,时隙占有者的回退时间短,从而真正获得时隙的信道使用权。Z-MAC 使用竞争状态标示来转换 MAC 机制,节点在 ACK 重复丢失和碰撞回退频繁的情况下,将由低竞争状态转为高竞争状态,由 CSMA 机制转为 TDMA(Time Division Multiple Access)机制。可以说,Z-MAC 在低网络负载下类似 CSMA,在网络进入高竞争的信道状态之后类似 TDMA。Z-MAC 并不需要精确的时间同步,有着较好的信道利用率和网络扩展性。协议达到即时地适应网络负载变化的同时,TDMA 和 CSMA 机制的互换会产生大量的能耗,这对于网络负载的突发波动会造成网络延迟问题。

在节省能量方面,最具有代表性的仍是 Wei Ye 在 2002 年提出的 SMAC^[7]协议以及 2004 年提出的在 SMAC 协议基础上增加了自适应侦听的 A-SMAC^[8]协议。

到稿日期:2011-12-09 返修日期:2012-03-18 本文受国家自然科学基金项目(10901062),侨办科研基金项目(10QZR05)资助。

李 跃(1987-),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络、网络性能分析等,E-mail:hznzliyue@163.com;蒋文贤(1974-),男,硕士,副教授,主要研究领域为计算机网络、网络安全等,E-mail:jwx@hqu.edu.cn(通信作者)。

本文首先介绍 SMAC 协议,分析 SMAC 协议在 MAC 层节能方面的理论依据;然后通过理论分析得出负载变化时延与能耗之间的矛盾关系,为更好地平衡两者,提出改进后的 SMAC 协议,在网络负载变化的情况下进行占空比动态调整,以提高网络整体性能,有效缓解时延与能耗之间的矛盾。

2 SMAC 协议原理

SMAC 协议是由 USC/ISI 的 Wei Ye 等人提出的一种基于信道竞争的无线传感器网的 MAC 协议。该协议继承了 IEEE 802.11 MAC 协议和串音避免的 PAMAS^[9] 协议的基本思想,并在此基础上加以改进,以能量节省为主要的目标,实现了节点能量的有效利用。

2.1 周期性的睡眠/唤醒机制

信息采集的突发与随机性,使得节点在没有数据传输长时间地处在空闲侦听的状态,造成节点能量的无谓消耗。为此,SMAC 通过周期性的睡眠与监听机制来避免无谓的能量消耗,如图 1 所示。

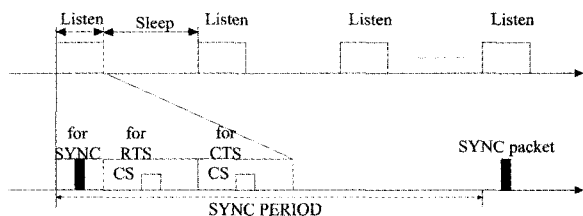


图 1 SMAC 周期性监听睡眠机制

在 SMAC 协议中一个完整的睡眠与监听时间为一个帧,监听时间为一个固定值,大小的确定依据物理层与 MAC 层的具体参数,如信道的带宽和碰撞窗口的大小。睡眠时间则是依据占空比和监听时间的大小来确定。

2.2 碰撞避免

为了避免冲突,SMAC 继承了 802.11 的物理和虚拟的载波监听机制,即在 MAC 层设置一个 NAV(Network Allocation Vector)来记录信道的使用情况。只有在 NAV 为 0 时,虚拟载波监听才结束,开始物理层的信号检测,经过 DIFS(DCF IF S)时间如果信道一直为空闲状态,则开始发送数据,否则开始执行碰撞避免算法。

2.3 选择和维护调度信息

在节点遵循一定的睡眠唤醒机制之前,首先要确定调度信息,并和邻居节点进行交换,每个节点都维护一个调度表来存储邻居节点的调度信息。

节点在初始化的时候都要先随机地侦听一段时间,最少为一个同步周期,如果在这段时间内没有收到来自邻居节点的调度信息,则依据节点占空比随机产生属于自己的调度信息,并在下一个同步周期通过 SYNC 广播到邻居节点。如果在没有确定自己的调度信息之前收到了邻居节点的调度信息,则将自己的调度信息设置为与邻居节点相同,并在下一个时间广播。当节点收到多个不同节点的调度信息时,选取最先收到的信息进行同步,并记录所有收到的调度信息,在必要时供不同虚拟簇之间通信使用。如果是在节点确定了调度信息之后收到了其他的调度信息,要分两种情况:如果节点没有邻居节点则丢弃先前采用的调度策略,并采用新收到的信息,否则同时采用两种调度策略。此时节点为边界节点。

2.4 自适应侦听

采用了侦听睡眠机制以后,可能会导致节点在传递信息时产生较长的时延。为了尽可能减少时延,文献[8]设计了 A-SMAC(Adaptive Sensor MAC),它采用一种自适应侦听的机制,使得那些监听到邻居节点信息传递(RTS/CTS)的节点在 NAV 为 0 时醒来一段时间,如果此时自己为消息传递的下一跳节点,那么它的邻居节点则直接将信息传递出去,避免了因为睡眠可能导致的时延。如果在自适应侦听的时间段内没有侦听到任何的信息,在自适应侦听时间结束时,节点进入正常的睡眠状态。

通过以上所采取的各种节能机制,节点可以最大限度地减少能量的消耗。但其仍会产生一定的数据传输延时,在某些传感器网络的监测应用中,除了能量的有效利用外,数据传递的及时准确也十分重要。此时,节能的程度与延时的大小都会影响整个无线传感器网络的性能。

3 协议改进分析

3.1 SMAC 时延与能耗分析

SMAC 是在 802.11 基础上构建的基于信道竞争的 MAC 协议,在一个多跳的 802.11 协议当中,当一个包从产生到顺利到达目的节点,每一跳经历的延时如下:(1)载波监听延时;(2)后退延时;(3)发送延时;(4)传输延时;(5)处理延时;(6)排队延时。除了上述的延时因素以外,在采用了 SMAC 协议的多跳网络当中,由于睡眠机制的应用,下一跳节点可能处在睡眠状态,发送节点必须等待下一跳节点睡眠时间结束才可以将数据传输出去,因此会产生相应的睡眠延时。

在分析节点延时大小时,做如下的假设:

- (1) 整个网络的负载很小,只有一个数据包需要传输,因此可以忽略排队延时和后退延时。
- (2) 由于节点间距离相对较小,因此可以忽略传输延时。
- (3) 每一跳监听时延都相同,定义为 $t_{s,n}$,由竞争窗口大小决定。
- (4) 多跳的节点都采用相同的睡眠侦听周期。

因此需要考虑的只剩下监听时延、发送时延和睡眠时延。

假设一个多跳场景如图 2 所示,共有 3 跳,节点 i 发送数据给 l ,在节点 i 即第 n 跳时的等待延时为:

$$D_n = t_{s,n} + t_{cs,n} + t_{tx} \quad (1)$$

其中的延时因素依次为等待下一跳节点睡眠结束的睡眠时延 $t_{s,n}$ 、本节点监听时延和发送时延 t_{tx} 。

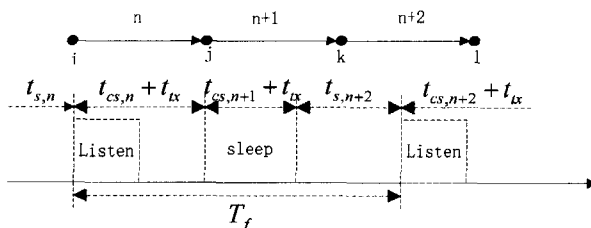


图 2 自适应侦听 SMAC 时延

当节点 i 和节点 j 使用了 RTS/CTS 交换后,节点 j 的下一跳节点 k 通过监听到的 CTS 包得知节点 i 到节点 j 的传输会在什么时候结束。由于采用了自适应侦听的机制,节点 k 会立即结束睡眠,开始侦听是否有数据要传输给自己,因此在

节点 k 即第 $n+1$ 跳时的等待时延为:

$$D_{n+1} = t_{cs,n+1} + t_{tx} \quad (2)$$

由于节点 l 离节点 j 有两跳的距离,因此无法侦听到 j 发出的 CTS 包,就无法像 k 那样在传输结束后立刻进行侦听,因此当节点 j 在占用睡眠时间给节点 k 传输数据时,节点 l 由于处在睡眠时间,就无法收到节点 k 发出的 CTS 包。当节点 k 再想给节点 l 传输数据时,就只能等到节点 l 的睡眠时间结束,在节点 l 处的等待时延为:

$$D_{n+2} = t_{s,n} + t_{cs,n} + t_{tx} \quad (3)$$

由以上分析可推出在一个 n 跳网络中,总延时为:

$$D_N = t_{s,1} + t_{cs,1} + t_{tx} + t_{cs,2} + t_{tx} + t_{s,3} + \dots + t_{cs,N-1} + t_{tx} + t_{cs,N} + t_{tx} \quad (4)$$

由图 2 可知:

$$T_f = t_{cs,n} + t_{tx} + t_{cs,n+1} + t_{tx} + t_{s,n+2} \quad (5)$$

式(4)可简化为:

$$D_N = t_{s,1} + (N/2 - 1)T_f + t_{cs,N-1} + t_{cs,N} + 2t_{tx} \quad (6)$$

所以, n 跳网络的平均延时为:

$$\begin{aligned} E[D(N)] &= T_f/2 + (N/2 - 1)T_f + 2t_{cs} \\ &= NT_f/2 + 2t_{cs} + 2t_{tx} - T_f/2 \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知,为了最大程度地减少空闲侦听,应采用较大的 T_f 增加休眠时间比重,而增加 T_f 却线性地增加了延时,这就是延时与能耗的矛盾问题。

SMAC 协议采用的是固定休眠调度机制来减少空闲侦听,周期长度与活动时间是不变的。SMAC 协议的周期长度受限于缓存大小和延迟的要求,活动时间则主要依赖于消息速率,这样固定的缓存大小与延迟要求和动态变化的消息速率会存在一个矛盾。如果要保证及时可靠的消息传输,必须增加节点的活动时间,但是当负载相对较小的时候,节点处于空闲侦听的时间就会相应地增加,从而造成了不必要的能量浪费,而负载过大会造成吞吐量的降低和时延的增加。

3.2 D-SMAC 协议

如前所述,SMAC 由于采用固定占空比机制,因此无法自适应网络负载的变化。为此,设计一种动态调整占空比的 MAC 协议——D-SMAC (Delay Sensor MAC)。该协议在 SMAC 基础之上进行改进,能根据数据包在队列中等待时间长短的平均值动态地调整占空比,可将时延控制在可容忍范围之内,并将保证了能量的有效性。

在改进协议中,将数据包在缓存队列中的等待时延,即数据包进入缓冲队列的时间与数据包离开队列的时间之差,作为衡量网络负载大小的依据。当延迟过大,以致超过了容忍的上限时,将占空比增加一倍,反之,时延在可容忍范围之内,将占空比减小一半。

3.3 新占空比的确定

一段时间内,目标节点 i 通过计算数据包头所记录的时间,分别得到节点的传输延迟。设数据包个数为 N ,传输时延分别为 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$,平均延迟为 $D_{av}(i)$,则有:

$$D_{av}(i) = \sum_{k=1}^N D_k / N \quad (8)$$

节点初始化时采用基本占空比,每个接收节点计算 $D_{av}(i)$,当节点发现 $D_{av}(i) > Delay_max$ 时,说明网络负载较大,将占空比增加一倍,以减少端到端的时延。若 $D_{av}(i) < Delay_min$ 时,D-SMAC 协议认为网络负载很低,可以适当地延长

节点睡眠时间来节省节点的能量,将占空比调整为先前的一半。其中 $Delay_max, Delay_min$ 分别为接收节点可以容忍的最大和最小时延。占空比的调整通过新周期个数 $cycle_num_$ 进行,初始值为 1。新周期个数是在原有一帧上进行的等分,当占空比成倍变化时,相当于 $cycle_num_$ 成倍增加或减少。

为了保证在占空比调整之后仍可以和采用原有占空比节点通信,需要在原有周期的同步时间段开始统计,时间跨度为一个同步周期。在新的 D-SMAC 协议中,为了更好地监测网络的负载情况,设置同步周期为一个帧的长度,并假设数据传输时不进行分组。图 3 为 $cycle_num_$ 为 2 的情况,设基本周期为 T_{frame} ,采用新占空比后,新周期的睡眠时间为 T_{sleep} ,基本周期与新周期的数据时间相同,为 $T_{rts/as}$ 。为保证数据的发送不与下个新周期的 RTS/CTS 冲突,新周期的睡眠时间最小为 $T_{rts/as}$,则有:

$$\begin{aligned} T_{frame} &= (T_{RTS/CTS} + T_{data})R_{max} + T_{SYNC} \\ &= T_{RTS/CTS} + T_{sleep} + T_{SYNC} \end{aligned} \quad (9)$$

$$cycle_num_{max} = \frac{T_{RTS/CTS} + T_{sleep}}{T_{RTS/CTS} + T_{data}} \quad (10)$$

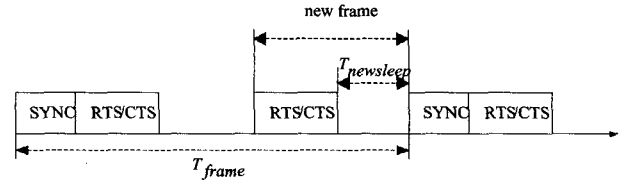


图 3 新周期与基本周期关系

```

Step1 handleDATA
{
    Sumdelay_ = sumdelay_ + delay_ //其中 delay_为单个数据包的
    时延
}
Step2 sendSYNC
{
    //根据 sumdelay_大小确定新的占空比
    If(avdelay_ > Delay_max && cycle_num_ < cycle_num_max) then
        Cycle_num_ = 2 * cycle_num_
    end if
    If(avdelay_ < delay_min && cycle_num_ > 1) then
        Cycle_num_ = cycle_num_ / 2
    end if
    //在 SYNC 包中记录新的 cycle_num_
}
Step3 handleSYNC
{
    If(newcycle_num > cycle_num_ && if q -> length() > 0)
    then
        cyle_num_ = newcycle_num
    end if
    callchange(cycle_num) //调整占空比
}

```

图 4 占空比调整过程

为了降低节点的同步成本,新周期的调整信息通过原有的 SYNC 同步帧交换。图 4 为占空比调整过程。接收节点通

过 $cycle_num$ 反馈给发送节点当前的网络负载情况,所有收到同步信息的节点查看自身缓存队列是否有数据需要发送,如果不为空,则更新为最新的占空比,否则,不做任何处理。发送节点根据收到的新周期的个数调整占空比的大小,适当地延长或者是缩短节点的睡眠时间。

4 仿真实验和结果分析

本文采用 UC Berkeley 开发的网络仿真器 NS2 对无线传感器网络进行仿真。具体仿真环境如下:

系统平台: Windows XP Professional Service Pack 3。

Unix 仿真器: cygwin(一个在 Windows 平台上运行的 Unix 模拟环境)。

网络仿真器: NS2(ns-allinone-2.30)。

相关工具: Gnuplot-3.8j, Nam-1.11, Gawk。

在 NS2 仿真环境中构建如图 5 所示的线性拓扑结构。这里采用线性拓扑结构的原因有: (1) 仿真对象是研究无线传感器网络基于不同 MAC 协议下的性能表现,而 MAC 协议的主要工作机制是控制节点工作,与整个网络的拓扑结构无关,因此不用考虑复杂的路由情况。(2) NS2 构建库中目前没有适用于无线传感器网络的路由协议,只能采用传统网络路由协议 DSR 协议等,而这类协议只选定一条路由进行数据传输。所以,只采用线性拓扑结构。仿真参数设置如表 1 所列。

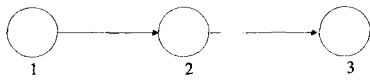


图 5 实验拓扑结构

表 1 仿真参数表

参数	数值
占空比	10%
场景大小	100 * 100
节点通信距离	10(m)
节点距离	10(m)
数据包长度	50bytes
初始能量	1000J
发送功率	386 mW
接收功率	368.2mW
空闲功率	344.2mW
睡眠功率	5.0e-5mW
节点个数	3

在线性拓扑网络中分别对比 SMAC、A-SMAC 和改进后占空比可以动态变化的 D-SMAC 协议,对网络的整体性能进行比较,这里的性能主要指吞吐量、平均收发数据包的延迟时间以及能耗。

4.1 网络吞吐量分析

随着代表网络负载情况的发送间隔的变化,不同协议之间会有不同的丢包率。如图 6 所示,在网络负载较重时,由于 SMAC 采用了固定的周期性睡眠机制,导致大量的数据包因节点的睡眠而发送不出去,丢包率严重。采用了自适应侦听的 SMAC 协议,可以在上一跳节点完成传输后继续侦听一段时间,缩短了接收节点的睡眠延迟。而采用改进后的 D-SMAC,可以根据网络负载自主地改变占空比的大小,延长或者缩短节点的睡眠时间,十分有效地降低了节点之间的丢包率。

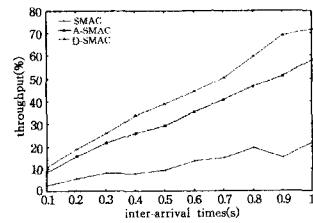


图 6 网络吞吐量

4.2 网络时延分析

图 7 显示了不同网络负载情况下数据包的延迟。其中 SMAC 最差,因为每次的传输都必须是在节点处于非睡眠状态下,由于初始时采用 10% 的占空比,导致端到端时延非常严重。采用了自适应侦听机制以后,可以有效地降低数据包在中转节点的时间,从而降低整体时延, D-SMAC 在 A-SMAC 基础上有效地减少了时延。

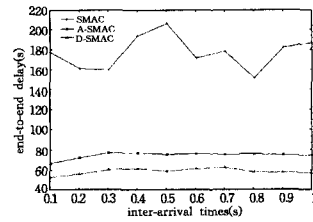


图 7 网络时延

4.3 网络能耗分析

D-SMAC 协议与 SMAC 协议在总的能量消耗方面基本持平, A-SMAC 协议耗能最小,如图 8 所示。D-SMAC 协议耗能多,一方面因为 SYNC 包字段增加,发包成本也会随之变大;另一方面是因为新的占空比允许了节点处于更多时间的非睡眠状态,导致了耗能的增加。A-SMAC 可以使得无关节点在收到 RTS 包之后处于睡眠状态,从而耗能最小。

然而当考虑节点能量的有效能耗,即成功传输单个数据包耗能大小时, SMAC 的有效能耗最差, D-SMAC 与 A-SMAC 基本持平,如图 9 所示。对比三者,综合比较耗能总量与网络吞吐量之间的关系后, D-SMAC 虽然总能耗与 SMAC 持平,但在能量的有效利用方面仍优于原有 SMAC 协议。

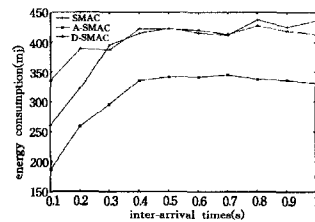


图 8 网络总能耗

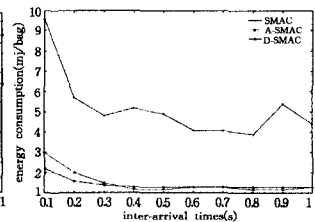


图 9 网络有效能耗

结束语 能量与时延是无线传感器网络研究中的热点,通过 SMAC 的睡眠唤醒机制可以有效地减少传感器节点的能量损失,但同时增加了时延。本文采用动态占空比的调整机制,根据网络负载大小自适应地增加或者减少占空比。仿真实验结果表明,改进后的协议在网络的整体时延、吞吐量和能量消耗方面都有较大的改进。

参考文献

[1] Bansal D, Kalia M, Anvekar D, et al. MAC scheduling and SAR policies for Bluetooth; A master driven TDD picocellular wireless system[J]. MoMuc, Nov 1999

种有效的原始作者识别方法,即借助于特征提取方法和文本分类技术,先对原始语料进行训练学习,然后把从争议作品中提取的特征输入到已训练分类器中,最后输出作者或作品类别。该方法能够辅助解决争议作品(特别是著名作者的争议作品)的版权纠纷,打击盗版,维护诚信。该方法也可以扩展应用于其它文本分类中。同一作者在不同时候的行文风格可能不同,这就给基于学习的分类方法带来了困难,未来的工作重点是如何提取出更能代表原始作品的特征来提高文本分类的精度。

参 考 文 献

[1] Yang L, Wang S. Fast text categorization approach based on distribution character of class[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(5): 1267-1269

[2] Mehdi H A, Nasser G A. Text feature selection using ant colony optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 6843-6853

[3] Tsoumakas G, Katakis I. Multi-label classification: An overview [J]. International Journal of Data Warehousing and Mining, 2007, 3(3): 1-13

[4] Zhang H P, Liu Q, Cheng X Q, et al. Chinese Lexical Analysis Using Hierarchical Hidden Markov Model[C] // Proc of 2nd SIGHAN workshop affiliated with 41th ACL. Sapporo, 2003: 63-70

[5] Zhang H P, Liu T, Ma J S, et al. Chinese Word Segmentation with Multiple Postprocessors in HIT-IRLab [C] // Proc of SIGHAN'05. 2005: 172-175

[6] 中科院计算所数字化研究室. 概率句法分析器[OL]. http://mtgroup.ict.ac.cn/ictparser/parser_1.php, 2011-07-10

[7] 刘挺, 马金山, 李生. 基于词汇支配度的汉语依存分析模型[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 1876-1883

[8] 孙星明, 殷建平, 陈火旺, 等. 汉字的数学表达式研究[J]. 计算机研究与发展, 2002, 9(6): 707-711

[9] 哈尔滨工业大学信息检索研究室. LTP[OL]. <http://ir.hit.edu.cn/demo/ltp/>, 2012-01-12

[10] Shi Tong-nian, Lu Zhong-liang. Research on the Chinese text categorization of multi-classification and multi-label[J]. Journal of Chinese Information Process, 2003, 22(3): 306-309

[11] Trohidis K, Tsoumakas G. Multilabel classification of music into emotion[C] // Proceedings of the 9th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR). 2008: 76-85

[12] Han Jia-wei, Pei Jian, Yin Yi-wen. Mining Frequent Patterns without Candidate Generation[C] // Proc. 2000 ACM-SIGMOD Int. Conf. Management of Data (SIGMOD'00). 2000: 1-12

[13] Huang Xuan-jing, Wu Li-de. Language independent text categorization[J]. Journal of Chinese Information Process, 2000, 14(6): 1-7

[14] Wang Zhen, Musajan W. Text Feature Selection Method Based on Improved TFIDF[J]. Modern Computer, 2009, 7(10): 34-36

[15] Lin Yong-min, Lv Zheng-yu, Zhao Shuang, et al. Analysis and improvement of feature weighting method TF · IDF in text categorization[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(11): 2923-2925

[16] 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

(上接第 89 页)

[2] The working group for WLAN standards. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[R]. IEEE 802. 11 standards, Part 11, Technical report, IEEE, 1999

[3] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C] // Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore, 2004: 95-107

[4] Rajendran V, Obraczka K, Garcia-Luna-Aceves J J. Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for wireless sensor network[C] // Proc. of the ACM SenSys 2003. Los Angeles, 2003: 181-192

[5] Rhee N, Warrier A, Aia M, et al. ZMAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks[C] // Proc. of the 3rd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2005). San Diego: ACM Press, 2005: 90-101

[6] Gupta N, Kumar P R. A performance analysis of the 802. 11 wireless LAN Medium access control[J]. Communications in information and systems, 2004, 3(4): 279-304

[7] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C] // Twenty First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings (INFOCOM 2002). IEEE, 2002: 1567-1576

[8] Wei Ye, Heinemann J, Estrin D. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE, Acl Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-

506

[9] Singh S, Raghavendra C S. PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for ad hoc networks[J]. ACM Comput. Commun. Rev. , 1998, 28(3): 5-26

[10] Lin P, Qiao C, Wang X. Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks[C] // Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2004: 1534-1539

[11] Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys'03). 2003: 171-180

[12] 蹇强, 龚正虎, 朱培栋, 等. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展 [J]. 软件学报, 2008, 19(2): 389-403

[13] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络 [J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282

[14] 王辛国, 张信明, 陈国良. 时延受限且能量高效的无线传感网络跨层路由 [J]. 软件学报, 2011, 22(7): 1626-1640

[15] 谭长庚, 肖渊, 王建新. 无线传感器网络中节点睡眠调度机制研究 [J]. 计算机科学, 2008, 35(5): 51-54

[16] 苏金钊, 刘丽艳, 吴威. 适用于周期休眠 MAC 协议的分簇时间同步算法 [J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(11): 1893-1902

[17] 罗俊, 蒋铃鸽, 何晨. 一种多跳无线传感器网络中基于 SMAC 协议的性能分析模型 [J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(11): 1464-1472

[18] 孙利民, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学, 2005