传感器网络的任务双效节能调度研究

王小英[1,2],赵 海[2],陈英革[1],尹震宇[2]
(1. 常熟理工学院计算机系,江苏常熟 215500; 2 东北大学信息科学与工程学院,辽宁沈阳 110004)

摘 要: 能源供应有限性是局限传感器网络的性能和存活寿命的重要因素,本文从传感器网络节点的任务调度出发,提出动态能量管理 DPM 和动态电压/频率调节 DVFS的双效处理器节能调度算法,即 DVFS-RM 和 DVFS-EDF调度算法;在 DPM 动态控制空闲任务进入休眠的同时,在保证节点的实时性的前提下,通过 DVFS-RM 或 DVFS-EDF算法降低处理器频率,达到更好的节能效果. 实验显示,该节能任务调度算法使以电池为能源的传感器网络节点的生存期成倍地延长.

关键词: 传感器网络; 动态能量管理; 动态电压/频率调节; 任务调度; DVFS-RM; DVFS-EDF
中图分类号: TP316 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 05-0778-06

Dual Power Aware Task Scheduling in Sensor Network

WANG Xiao-ying[1,2], ZHAO Hai[2], CHEN Ying-ge[1], YIN Zhen-yu[2]
(1. *Department of Computer Science, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500, China;*
2. *School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China*)

Abstract Limited power supply is the uppermost constraint factor to sensor network performance and lifetime. Based on processor task scheduling of sensor network node, this paper put forward voltage and sleep dual-effective scheduling algorithm in term of dynamic power management and dynamic voltage/frequency scaling, namely DVFS-RM and DVFS-EDF. On the premise of guarantee node real time performance, the policy can not only dynamically control idle task to enter sleep mode but also reduce processor frequency to achieve better power save effect through DVFS-RM or DVFS-EDF algorithm. Experiments show that the effect of the power aware task scheduling algorithm is remarkable which can extends the lifetime of sensor network node several times which mainly depend on batteries power supply.

Keywords sensor network; dynamic power management; dynamic voltage/frequency scaling; task scheduling; DVFS-RM; DVFS-EDF

1 引言

传感器网络能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,通过嵌入式系统对信息进行处理,并通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知的信息传送到用户终端,从而真正实现“无处不在的”普适计算理念.

传感器网络从总体上说,和常规的无线计算机网络、嵌入式系统、实时分布式系统的有很多相似性. 但因应用环境、功能和能量供应方式的不同,必然存在着很大差异. 能量供应受限是传感器网络的一个主要矛盾,本文就此重点分析了传感器网络及任务调度系统的特点,分析研究了在满足实时可靠性的前提下,如何减少节点功耗,延长传感器网络节点和网络的生命周期. 在这个领域,很多学者都做了相关的工作. Cheng等在文献[1]提出了通过合理编排任务的执行顺序,以减少处理器内部和外围设备的能耗,但其方法只能离线计算并在实时系统中固定下来. Chae Dong-Hymn等在文献[2]、Yanxia Rong等在文献[3]分别提出了两种传感器网络根据相互位置和距离参数,通过合理化网络拓扑结构而减少数据传输的能量损耗,这一问题被证明是NP问题. Bong-Jun Ko在文献[4]研究了在传感器网络节点分布密度高的区域,如何保证采集数据的精度条件下,减少投入运行的节点个数;使部分节点处于潜伏的休眠态,以延长整个网络的存活期. Yang Yu等同样在文献[5]中阐述了如何在传感器

收稿日期: 2005-04-26; 修回日期: 2005-12-30
基金项目: 国家自然科学基金(No. 60203011); 江苏省教育厅自然科学基金(No. 05KJD520005)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

网络中平衡节点负载、延长网络整体寿命. Hakan Aydin在文献[6]结合 CMOS器件电压和频率的关系, 分析处理器的能耗和速度的关系, 并着重讨论了 EDF(Earliest Deadline First)算法在可变速的处理器中的应用, 理论分析深入. Barbara Hohlt在文献[7]通过有效地动态控制通信过程中无线通信模块收、发、空闲状态的转换, 达到节能目的, 简单实用、效果良好. 本文在实验中的 DPM 功能中添加了这一算法. 本文在第二部分阐述了传感器网络的特点及对任务调度策略的新要求; 第三部分在分析了 DPM (Dynamic Power Management)与 DVFS (Dynamic Voltage/Frequency Scaling)、两种节能策略的基础上, 针对 RM (Rate Monotonic)和 EDF算法, 重点介绍了 DVFS-RM 或 DVFS-EDF算法的框架模型; 第四部分通过实验评价了算法的节能效果, 最后对论文进行了总结与展望.

2　传感器网络对任务调度策略的新要求

传感器网络技术因其在军事侦察、工业生产控制、森林火灾监控、医疗监护、农业养殖和太空探索等众多领域的巨大的应用价值得到了各国政府、军方、跨国公司和科研机构的关注与重视. 2003年 2月的美国《技术评论》杂志评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术, 传感器网络被列为第一. 随着传感器网络应用的日益发展与不断深入, 传感器网络已成为当今世界工业界与学术界的研究热点. 但大部分的研究尚处于起步阶段, 少数投入实用的商业产品距离实际需求还相差甚远, 存在着许多值得探讨的热点课题.

2.1　传感器网络的特点

在传感器网络中每个传感器节点既是传感器、又是路由器, 具有有限的计算能力、有限的存储能力、有限的无线通信能力和有限的电源供应. 传感器网络与传统网络具有很大的不同点, 传感器网络的主要特征和需要解决的关键矛盾如下:

(1)传感器网络的动态拓扑性

传感器网络中的节点都兼备数据采集和无线网络路由功能, 网络中不存在中心控制点, 用户节点之间的地位是平等的. 传感器网络具有一定的动态性, 网络中的传感器、感知对象和观察者这三要素都可能具有移动性, 并且经常有新节点加入或已有节点失效, 因此网络的拓扑结构会经常动态变化, 为此传感器网络路由必须具有可重构性、自调整性和自我配置性.

(2)能耗有限性

传感器网络的节点大都采用电池, 更换周期长或者不更换, 能量约束强. 网络系统优化的主要目标是减少能量消耗和促进负载均衡, 以提高网络生存时间. 为此每个节点必须能感知环境的变化及网络拓扑结构的变化, 优化自身的工作状况, 减少和消除不必要的能源消耗.

(3)节点资源有限性

传感器网络中的传感器节点大都采用嵌入式处理器和存储器, 数据吞吐量小、计算能力弱、储能空间小. 通信资源也很有限, 受到传感器的电源能量的限制, 网络中的传感器节点经常由于能源的原因失效或废弃. 为节约电耗, 必须减少节点的通信时间和距离.

(4)数据传感和传输的不可靠性

由于传感器网络经常受到高山、建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境因素的影响, 传感器可能会长时间脱离网络、离线工作, 传感器节点之间的通信断接频繁, 经常通信失败. 同时检测感应器件也会因环境的破坏和能源不足而失效, 采集的数据会发生失真或丢失, 网络连接和数据传输相对其他网络稳定性和可靠性能差.

2.2　传感器网络对任务调度提出的新要求

传感器网络是由多学科高度交叉的新兴前沿技术, 在很大程度上融合了传感器技术、微电子技术、微细加工技术、SoC(System on Chip)芯片技术、纳米材料技术、无线通信技术、计算机网络技术等, 以实现其微型化、集成化、多功能化及系统化、网络化. 传感器网络的上述特点对现有技术在很多层面提出挑战, 同样对任务调度系统也提出很多全新的功能要求, 要求传感器网络任务调度系统必须满足稳定可靠的实时性和节点间的协调一致性; 尽量降低能源消耗, 避免不必要的能源浪费, 延长传感器网络节点和网络的存活周期.

传感器网络在任务调度方面主要解决下列三方面的矛盾:

(1)传感器网络的数据采集、处理和动作反应都有一定的时间有效性, 具有很强的实时性. 对于不同的事件, 要求的响应时间不同, 传感器网络操作系统必须内置可靠高效的实时任务调度机制.

(2)采用嵌入式实时系统常规的 RM、EDF调度虽然能满足系统的部分实时性能, 但出于资源占用和能耗的考虑, 还需进一步优化, 如加强对能源消耗的控制和管理, 系统能自动根据环境的变化, 关闭部分或全部功能, 控制任务 (特别是通信)进入休眠和半休眠状态, 必要时还能及时唤醒, 减少不必要的能源消耗, 同时减少任务抢占次数以降低抢占的开销, 操作系统必须有以能源消耗和状态为优化对象的任务调度机制.

(3)另一个比较复杂的矛盾是, 传感器网络是一个分布式信息处理系统, 网络上的节点是移动的, 变化的, 由于环境的恶劣和能源的不足, 节点的工作状态是不稳定的, 网络的拓扑结构的动态变化有很大的随机性, 因此要求分布式任务调度系统有很强的动态适应性.

3　传感器网络的任务调度

为增加电池的使用寿命, 传感器网络操作系统使用能量感知方式管理系统资源能更进一步减少能耗, 通常使用

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以下两种节能策略: 动态能量管理 DPM 和动态电压/频率调节 DV/FS

3.1 DPM 动态能量管理

DPM 的工作原理是, 当节点周围没有相关事件发生时, 部分功能模块处于空闲状态, 关闭或使其处在低能耗的休眠状态. 其中增加无线收发器休眠时间是节能的重要方式. 据统计, 传感器传输信息要比执行计算更消耗电能, 传输 1比特信息所需要的能源可以支持 CPU 进行 3000条指令的运算. 无线收发器有四种操作模式: 发送、接收、空闲和休眠. 除休眠状态外, 其他三种状态的能耗都很大, 如表 1所示, 接近前者的 100倍. 而空闲状态的能耗接近于接收状态, 所以当传感器节点不收发数据时, 操作系统应自动关闭无线收发器或进入休眠状态.

表 1 无线收发器在各个状态时的能耗

收发器状态	能耗(mW)
发送	14.88
接收	12.50
空闲	12.36
休眠	0.016

同时, 状态转换需要消耗一定的能量, 并且带有时延, 所以状态转换策略要非常恰当. 如果状态转换策略不合适, 不仅无法节能, 反而会导致能耗的增加, 还会影响实时性能. DPM 的状态转换可如图 1所示.

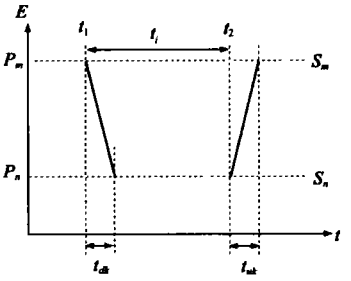


图 1 状态转换和能量的关系

假定状态转换分别发生在 t_1 和 t_2 时刻, 其中 $t_2 = t_1 + t_i$. 在 t_1 时刻节点 k 想要从 S_m 状态进入休眠状态 S_n, 在 t_2 时刻需要从 S_n 返回到 S_m 状态, 每个状态都有对应的能耗 P_m 和 P_n, 状态转换分别需要时间 t_{dk} 和 t_{uk}. 则能量节约如公式(1)所示:

$$E_{save} = P_m \times t_i - \frac{P_m + P_n}{2} \times (t_{dk} + t_{uk}) - P_n \times (t_i - t_{dk}) \quad (1)$$

只有当 t_i 大于某一数值时, E_{save} 才能大于零, 从而实现节能.

3.2 DV/FS 动态电压/频率调节

DV/FS的工作原理是, 当计算负载较低时, 通过降低微处理器的工作电压和频率从而降低处理能力, 可以节约微处理器的能耗. 根据 CMOS芯片器件功耗特性, 即 $P_d = C_{eff} \cdot V_{dd}^2 \cdot f$, 其中 C_{eff} 为电容, 这里是常数, V_{dd} 指工作电压, f 是工作频率. 可以得出 CMOS处理器芯片的功耗与工作频率和工作电压的平方成正比. 另外, 在工作频率低时, 处理器的额定工作电压也可以适当降低, 所以, 在响应速度允许的条件下, 动态调节处理器工作电压和频率是有效节能的较好方法.

传感器节点大部分时间计算负载较低, 在低负载时调低微处理器的电压/频率可以有效节约能量. 很多处理器如 StrongARM 和 Crusoe都支持电压/频率调节.

3.3 DPM 和 DV/FS双效调度算法

在任务调度系统中使用上面的节能策略, 可以有效地节约能量, 如果同时使用 DPM 和 DV/FS, 比如在计算负载下降时使用 DV/FS降低微处理器的处理能力, 在节点长期处于空闲状态时, 使用 DPM 将微处理器调到休眠状态, 将会大大降低微处理器的能耗, 从而延长节点的生存期.

传感器网络节点的主要工作是周期性地采集和传输数据, 处理的任务主要是周期任务. 对于周期性任务, 使用 DV/FS方法, 通过降低微处理器的工作电压和频率从而降低处理器能耗而有效节约能量, 同时必然延长周期任务的执行时间, 影响传感器网络节点的实时性; 使用 DPM, 部分任务在正常和休眠状态间切换, 因此处理器的负载是变化的. 要求 DV/FS自动根据处理器负载的动态变化作动态调整, 并满足实时可靠性要求, 就需要调度算法能根据 DPM 控制休眠作业的情况及实时性能要求, 计算出处理器运行速度的下限, 对处理器工作电压/频率自动调整, 使其工作在节能的最佳状态.

3.3.1 DV/FS-RM 调度算法

C L Liu和 JW Layland于 1973年提出了著名的 RM[8] 调度算法, 这个算法根据任务的执行周期来分配固定的优先级, 执行周期越短则分配的优先级越高. 文献[8]还证明 RM 算法是一个最优的静态优先级抢占式调度算法, 这个算法能够保证 n 个周期性任务在它们的处理器的利用率 $U = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{T_i} \leqslant n(2^{1/n} - 1)$ (其中 U 是 n 的减函数, 当 $n \to \infty$ 时, $U \to 0.693$) 情况下, 所有的任务都能在其截止期前完成, 既任务集为可调度.

RM 调度算法在编排任务优先权时主要依据两个参数: 任务的最坏执行时间 C_i 和任务的执行周期 T_i, 同时限定[9]: (1)所有的任务之间相互独立; (2)所有的任务都是周期性的; (3)所有的任务不需要阻塞等待外部事件; (4)所有的任务在其执行周期的开始时就处在就绪状态; (5)所有的任务有一个截止期 $D_i = T_i$.

RM 调度算法在系统的实际运行中出现不可调度任务时, 会出现多米诺效应, 影响到后续的任务调度.

应用 DPM 使周期任务在休眠和工作状态间切换, 被调度的可执行任务集是变化的, 处理器的计算负载跟随变化, 因此 DV/FS可以调整处理器频率, 尽可能采用能耗低的低处理器频率. DV/FS-RM 算法研究的就是在满足 RM 可调度条件下, DV/FS能采用的最低处理器工作频率.

定义 n 个周期性任务 $Task_1, Task_2, \ldots\ldots, Task_n$, 其中, 任务 $Task_i$ 的执行周期为 $T_i (1 \leqslant i \leqslant n)$, 最坏执行时间为 $C_i (1 \leqslant i \leqslant n)$, 相位为 $I_i (0 \leqslant I_i \leqslant T_i)$, 那么任务 $Task_i$ 的执行期从 $I_i + kT_i$ 开始到 $I_i + (k+1)T_i$ 结束. 我们按任务的执行周期排序 $T_1 \leqslant T_2 \leqslant \ldots \leqslant T_n$, 忽略任务的阻塞情况, 则任务 $Task_i$ 在 $I_i + kT_i$ 到 $I_i + (k+1)T_i$ 时间段内拥有优先权, 可以

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

抢占别的任务.

当处理器为标准工作频率 f 时, 周期性任务 $Task_i$ 的最坏执行时间为 C_i ($1 \leqslant i \leqslant n$), 当处理器工作频率调整到 f' 时, 其最坏执行时间 C_i' ($1 \leqslant i \leqslant n$) 为:

$$C_i' = (f/f')C_i \tag{2}$$

本文假设处理 I/O 等的任务执行时间和处理器工作频率成反比, 实际可能略有差别, 这里忽略这些差别.

文献[8]还证明了任务最繁忙的时刻是所有任务的相位为 $I_i = 0$ ($1 \leqslant i \leqslant n$) 时, 即所有任务同时要求立即执行的时刻. 同时, 定义:

$$W_i(t) = \sum_{j=1}^{i} C_j \cdot \lceil t/T_j \rceil \tag{3}$$

$$L_i(t) = W_i(T)/t \tag{4}$$

$$L_i = \min_{(0 < t \leqslant T_i)} L_i(t) \tag{5}$$

$$L = \max_{(1 \leqslant i \leqslant n)} L_i \tag{6}$$

John Lehoczky 等在文献[10]里证明了任务 $Task_i$ 可以在其截止期前完成的充分必要条件是:

(1)当且仅当 $L_i \leqslant 1$ 时, 处理器有能力正常处理任务 $Task_i$, 即 RM 调度算法此时能保证任务 $Task_i$ 在所有的时间段内都在截止期前完成.

(2)当且仅当 $L \leqslant 1$ 时, RM 调度算法能保证所有任务都可以在截止期前完成.

对于连续时间变量 t, 由式(3)、(4)可以看出 $L_i(t)$ 是以 T_i 为周期的分段单调递减函数, 因此只需分析测算当 t 为一个任务的执行周期 T_i 的整数倍时 ($1 \leqslant j \leqslant i$) 的情况, 其时间点集合 S_i 为

$$S_i = \{k \cdot T_j \mid j = 1, \ldots, i;\ k = 1, \ldots, \lceil t/T'[i] \rceil\}$$

则

$$L_i = \frac{1}{t} \min_{(t \in S_i)} \sum_{j=1}^{i} C_i \cdot \lceil t/T_i \rceil$$

$$= \frac{1}{t} \sum_{j=1}^{i} C_i \cdot (t/T_i) = \sum_{j=1}^{i} C_i/T_i \tag{7}$$

Yoshifumi Manabe 在文献[11]精简了调度点集合 S_i, 并定义精简的调度点集合 R_i 为:

$R_i = \bigcup_{j=1}^{i} Q_j^i$, 其中 $Q_i^i = \{T_i\}$, $Q_j^i = \{\lfloor t/T_j \rfloor T_j \mid t \in Q_k^i (j+1 \leqslant k \leqslant i)\}$ ($1 \leqslant j < i$)

这个集合满足 $R_i \subseteq S_i$. R_i 包括下列元素: T_i, 在 T_i 之前任务 $Task_{i-1}$ 的最后一个截止期, 在这两个任务截止期之前的任务 $Task_{i-2}$ 的最后一个截止期, 在这三个任务截止期之前的任务 $Task_{i-3}$ 的最后一个截止期 ……. 由于它们中的某些元素是相同的, 所以集合 R_i 中元素的个数 $|R_i| \leqslant 2^i$. 这样可以减少程序循环的次数, 在较大程度上降低算法的复杂度.

DV/FS-RM 调度算法模型以任务负载调节处理器频率, 动态地跟踪负载, 自动获得一个相对合理的处理器频率, 并随着负载的变化, 重新调整.

设 DPM 休眠的任务集合为 Q-DPM, $|Q$-$DPM|$ 为休眠任务的个数, 由 RM 调度算法的充分必要条件公式(3)和(4)可知, 如果 $L \leqslant 1$, 则任务集可调度完成. 当任务集变化时, 我们可以通过 DV/FS 调整处理器频率, 等比例放大缩小任务的最坏执行时间 $C_1, C_2, \ldots, C_i$ 为 $C_1', C_2', \ldots, C_i'$ ($1 \leqslant i \leqslant n$, $i \notin Q$-CPM), 使 $L' = 1$, 使任务集仍然可调度. 取放大系数为 K, 由于任务的周期不变, 根据公式(7), 得

$$L_i' = \frac{1}{t} \min_{(t \leqslant S_i)} \sum_{j=1,\ j \notin Q\text{-}DPM}^{i} C_i' \cdot \lceil t/T_i \rceil$$

$$= \frac{1}{t} \min_{(t \in S_i)} \sum_{j=1,\ j \notin Q\text{-}DPM}^{i} k \cdot C_i \cdot \lceil t/T_i \rceil = k \cdot L_i$$

得 $L' = \max L_i' = \max k \cdot L_i = k \cdot L = 1$

其中 ($1 \leqslant i \leqslant n$, $i \notin Q$-DPM)

$$k = 1/L$$

由公式(2)得:

$$(f'/f) = C_i/C_i' = 1/k = L \tag{8}$$

DV/FS-RM 调度算法在休眠任务集合为 Q-DPM 时, 可计算标准频率下任务集合的 L, 通过 DV/FS 将处理器频率放大到 L ($L \leqslant 1$), 仍为可调度任务集, 满足实时性要求.

采用这种方法计算 DV/FS 调节处理器频率, 算法的复杂度为 $O(2^{n-1})$, 根据 RM 算法的特性: 处理器的利用率 $U = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{T_i} \leqslant n(2^{1/n} - 1)$, 任务集为可调度. 令调整处理器频率后的任务的最坏执行时间为 $C'_1, C'_2, \ldots C'_i$ ($1 \leqslant i \leqslant n$, $i \notin Q$-DPM), 放大系数为 K, 令

$$U' = \sum_{i=1}^{n} \frac{C'_i}{T_i} = (n - |Q-DPM|)(2^{1/(n-|Q-DPM|)} - 1)$$

得

$$K \cdot U = (n - |Q\text{-}DPM)|)(2^{1/(n-|Q\text{-}DPM|)} - 1)$$

$$K = (n - |Q\text{-}DPM|)(2^{1/(n-|Q\text{-}DPM|)} - 1)/U$$

由公式(2)得:

$$(f'/f) = C_i/C'_i = 1/k$$

$$= U/(n - |Q\text{-}DPM|)(2^{1/(n-|Q\text{-}DPM|)} - 1) \tag{9}$$

采用公式(9)的 DV/FS-RM 调度算法, 算法的复杂度为 $O(n)$, 得到的结果虽然不精确, 但更快捷, 同时保证实时可靠性, 适合计算资源受限的传感器网络节点使用.

3.3.2 DV/FS-EDF 调度算法

EDF 调度算法也是由 *C L Liu* 和 *J W Layland* 首先提出来的[8], 它是一个动态优先级驱动的调度算法, 总是执行绝对截止时间最早的实时任务, 当前请求的截止时间最近的任务具有最高的优先级, 而截止期最晚的任务被分配为最低优先级. 这是基于如下的假设: (1)任何任务不存在不可抢占的部分, 且抢占的代价可以忽略; (2)只有处理器请求是有意义的, 内存、I/O、和其他资源请求可以忽略; (3)所有的任务都是独立的, 不存在先后次序的约束; (4)任务的相对截止期与它的周期相等 $D_i = T_i$.

EDF 调度算法是最优的单处理器调度算法[8], 即在上述假设条件下, 在单处理器上如果 *EDF* 调度算法不能调度一个实时任务集, 其他的调度算法也不可能. 这个算法能

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

保证在出现某个任务的最终期限不能满足之前,不存在处理器的空闲时间.对于给定周期性任务集的可调度性充分必要条件为:

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{T_i}\leqslant 1 \qquad (10)$$

其中, C_i, T_i分别为任务集中任务 i($1\leqslant i\leqslant n$)的最坏执行时间和执行周期.由此可知, *EDF* 调度算法最大的优势在于,对于任何给定的任务集,只要处理器的利用率不超过100%,就能够保证它的可调度性[8].

DV/FS-EDF 调度算法相对简单,根据 *EDF* 算法的特性,满足当且仅当 $U\leqslant 1$,任务集按 *EDF* 算法可调度.实际应用中,因为后台任务和非周期任务要占用处理器资源,所以对周期任务,一般控制处理器利用率 $U\leqslant L(L<1)$, *DPM* 控制的周期任务在休眠和工作状态变化时, *DV/FS-EDF* 根据负载变化,调整处理器频率,令调整处理器频率后任务的最坏执行时间为 C_1', C_2', …, C_i'($1\leqslant i\leqslant n$, 未Q-DPM),放大系数为 K

令 $U'=\sum_{i=1}^{n}\frac{C'_i}{T_i}=L$ ($1\leqslant i\leqslant n$, 未Q-DPM)

得 $K\cdot U=L$ $K=L/U$

由公式(2)得:

$$(f'/f)=C_i/C_i'=1/k=U/L \qquad (11)$$

采用公式(11)的 *DV/FS-EDF* 调度算法,在休眠任务集合为Q-DPM时,计算标准频率下任务集合的处理器利用率 U,算法的复杂度为 O(n),通过 *DV/FS* 将处理器频率放大到 U/L(L<1),仍为可调度任务集,满足实时性要求.

3.4 几点说明

DV/FS-RM 算法和 DV/FS-EDF 算法是专门针对调度算法分别采用 RM 和 EDF 而设计的,是综合了 DPM 和 DV/FS 双效调节的处理器调度算法,融合了两种节省电耗的方法,并保证了传感器网络节点的实时可靠性.这里, DV/FS-RM 和 DV/FS-EDF 调度算法得到的处理器频率是理论频率,是基于处理器频率是连续可调的假设.现有的处理器频率调节是离散的分级频率,所以在使用中要映射到实际的处理器频率范围内才有效,实际应用中的节能效果要受到处理器可调整频率范围的约束.

4 性能评价

在本实验中,对一个处在稳定状态的节点以 50ms周期循环检测温度,以 2.5s周期传输 36byte数据,在电池端串入 1Ω电阻,将电阻两端的电压信号接入示波器,分别在不使用节能调度算法、使用 DPM 和使用 DPM + DV/FS-RM 三种情况下,记录 10s的示波器显示图形,示波器放大倍数为 85,实测的电流应通过公式(12)进行转换.

$$I[\mathrm{mA}]=(V[\mathrm{V}]/(85\times 1))\times 1000 \qquad (12)$$

从图 2中可以看出,当节点不使用通信功能时, DPM 使通信模块休眠,通信时唤醒通信模块,由于通信过程的能耗相对较大,从 DPM 和 DPM + DV/FS-RM 的波形曲线中能看到较明显的阶跃,而没使用节能策略的电流曲线波动较平缓,平均电流也大.在没有使用节能策略时,测得的平均电流为 8.324mA,使用 DPM 的平均电流是 2.789mA,使用 DPM + DV/FS-RM 策略时,平均电流是 1.978mA.对于一个高能 AA 电池容量约为 1800mA-hours,电池平均寿命分别为 216.2hours(约 9天)、645.4hours(约 27天)、910hours(约 38天).节能效果达到延长节点寿命达 4.2倍.

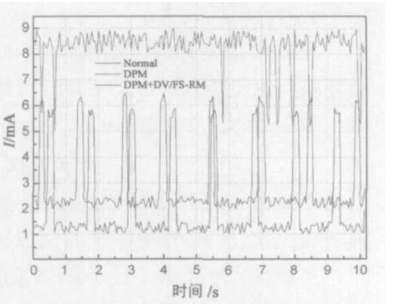


图 2 算法性能分析

下面以 Crusoe TM 5400为例,通过理论分析处理器的利用率和功耗的关系来观察 DV/FS-EDF 在此情况下的节能效果.设 $L=0.90$,处理器正常工作频率为 133MHz,调节范围为 200MHz~700MHz,频率调节步长为 33MHz,工作频率从 200MHz至 700MHz分成 16级,相应地电源电压也从 +1.1V 至 +1.65V 分成 16级,处理器额定耗电约 1.6W.

根据 CMOS芯片器件功耗特性公式 $P_d=C_{eff}\cdot V_{dd}^2\cdot f$,以及公式(10),计算得到的处理器的利用率和功耗关系曲线如图 3所示.

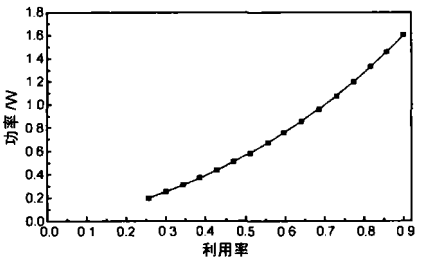


图 3 处理器利用率和功耗关系

从图 3中可以看出,采用 Crusoe TM 5400处理器,在周期任务条件下处理器的利用率为 0.26时,如果工作在额定工作电压/频率条件下,此时处理器功耗为额定值 1.6W,在满足实时性能前提下(保证周期任务的处理器的利用率≤0.9),采用 DV/FS-EDF 算法,计算得到处理器最佳工作电压/频率为 1.1V/200MHz,此时处理器功耗仅为 0.2W,节能 87.5%.

5 未来的工作

本文鉴于传感器节点能源供应受限的特点,结合节点的实时性能,分析了两种节能策略:动态能量管理 DPM 和动态电压/频率调节 DV/FS的相互关系以及与实时性能的矛盾.在传感器节点任务调度方面,提出了 DV/FS-RM 和 DV/FS-EDF 调度算法,以满足传感器网络节点的实时性能为前提,根据处理器的负载动态调节其工作频率,将 DPM 和 DV/FS两种策略有机地融为一体.从理论分析和一定条件下的实验效果上看,达到很好的节能效果,延长传感器

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

节点生命周期达 3-5倍, 显示此策略具有良好的应用前景.

本文仅就传感器网络单节点节约能耗问题做了初步的探索, 提出的解决方案还比较片面和粗糙, 传感器网络是以群体协作完成数据感知和传输功能的, 如何在节点分布密度不均匀的环境中, 采用相邻节点交换工作, 在达到感知数据的精度和时限要求下, 降低传感器网络整体的能耗, 使网络的存活期更长, 是下一步要进行的研究工作. 本文作为一种前期探索工作的小结, 希望能给有兴趣的同仁提供借鉴和参考, 集思广益, 以便为下一步在传感器网络节能方向做更细致深入的研究打好基础.

参考文献:

[1] Cheng S T, Chen C M, Hwang J W. Low-power design for real-time systems[J]. Real-Time Systems, 1998, 15: 131-148.

[2] Chae D H, Han K H, Lim K S, et al. Power saving mobility protocol for sensor network[A]. Proceedings of the Second IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems (WSTFEUS'04)[C]. Vienna, Austria: IEEE Computer Society, 2004: 122-126.

[3] Rong Y X, Choi H, Choi H A. Dual power management for network connectivity in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04)-WorkShop 12[C]. Santa Fe, New Mexico: IEEE Computer Society, 2004: 225b.

[4] Ko B J, Ross K, Rubenstein D. Conserving energy in dense sensor networks via distributed scheduling (Extended Abstract)[A]. Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt'03)[C]. Sophia Antipolos: ACM Press, 2003.

[5] Yu Y, Prasanna V K. Energy-balanced task allocation for collaborative processing in networked embedded systems[A]. Proceeding of Languages, Compilers, and Tools for Embedded Systems (LCTES'03)[C]. San Diego, California: ACM Press, 2003: 265-274.

[6] Aydin H, Melhem R, Mosse D, et al. Power-aware scheduling for periodic real-time tasks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2004, 53(5): 584-600.

[7] Hohlt B, Doherty L, Brewer E. Flexible power scheduling for sensor networks[A]. Proceedings of the third international symposium on Information processing in sensor networks (IPSN'04)[C]. Berkeley, California: ACM Press, 2004: 205-214.

[8] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment[J]. Journal of the ACM, 1973, 30: 47-61.

[9] Audsley N C, Burns A, Richardson M, et al. Applying new scheduling theory to static priority preemptive scheduling[J]. Software Engineering Journal, 1993, 8(5): 284-292.

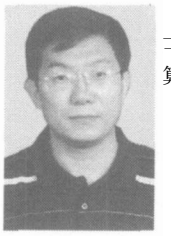
[10] John L, Lui S, Ye D. The rate monotonic scheduling algorithm: exact characterization and average case behavior[A]. IEEE 9th Real-Time Systems Symposium[C]. Santa Monica: IEEE Communication Society, 1989: 166-171.

[11] Yoshifumi M, Shigemi A. A feasibility decision algorithm for rate monotonic scheduling of periodic real-time tasks[A]. IEEE 1st Real-Time Technology and Applications Symposium[C]. Chicago: IEEE Communication Society, 1995: 212-219.

作者简介:

王小英　女, 江西波阳人, 2002年至今就读于东北大学攻读计算机应用技术专业博士学位, IEEE计算机协会会员. 主要研究方向为嵌入式实时系统、传感器网络.

E-mail: xiaoying_wang@cslg.edu.cn



赵　海　男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为普适计算、嵌入式计算机系统、数据融合、传感器网络.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net