

无线传感器网络的动态电压调节算法研究

魏 图 明, 余 思 佳, 魏 海 龙

(电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 对于能量有限的无线传感器网络, 研究如何高效地利用有限能量具有重要意义. 根据无线传感器网络多跳路由和拓扑易变的特点, 提出一种基于任务驱动的含反馈的动态电压调节算法 FB-DVS. 该算法根据节点的任务集实时地调节节点的工作电压和频率, 并通过反馈环节来修正误差, 在保证任务实时性的前提下降低节点能耗. 通过对仿真结果分析表明, 改进的算法能有效地减少节点的能量消耗, 延长无线传感器网络的生命周期.

关键词: 动态电压调节; 能量有效性; 功耗优化; 无线传感器网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)05-0023-05

Dynamic Voltage Scaling in Wireless Sensor Networks

WEI Tu-ming, YU Si-jia, WEI Hai-long

(School of Mechatronics Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: It is significant to research how to use the limited power efficiently for the energy contained wireless sensor networks. This paper proposed a tasks-driven feedback dynamic voltage scaling algorithm (FB-DVS) that based on the multihop routing and easily changed topology. FB-DVS could scale the working frequency and voltage levels dynamically according to the workload of sensor node, and fix the errors through feedback scheme and reduce the node's power consumption at the premise of real-time tasks. The results of simulation indicated that the improved algorithm could effectively reduce the energy consumption and prolong the life of wireless sensor networks.

Key words: dynamic voltage scaling; energy efficiency; power optimization; wireless sensor networks

1 引言

分布在一定区域的大量无线传感器节点组成了无线传感器网络, 每个节点由数据采集、数据处理和数据传输三个模块组成. 由于无线传感器节点一般由有限电源供电的, 特别是在恶劣环境下的节点电源更换会很困难, 节点的能效性问题将直接决定无线传感器网络生命周期的长短, 因而能耗问题成为无线传感器网络主要研究课题之一.

为了最大化无线传感器网络的生命周期, 一方面可以改进路由算法, 如生成树路由协议^[1]和分簇路由算法^[2]等; 另一方面可以使用动态功耗管理 (Dynamic Power Management, DPM) 和动态电压调节 (Dynamic Voltage Scaling, DVS) 技术^[3]对节

点实行能量约束. 其中, DPM 核心理念是节点在无负载任务时进入休眠状态, 关闭大部分系统空闲组件, 以减少能耗. DVS 则是在不牺牲传感节点性能的前提下节约节点在工作状态下的能耗. DPM 由于内在的概率特性一般应用于非实时系统, 而 DVS 能够很好地解决嵌入式实时系统中性能与功耗的需求. 由于 CMOS 集成电路的能量消耗是正比于时钟频率和供电电压^[4], 根据负载改变供电电压和时钟频率, 能有效地降低节点能耗. 文中结合无线传感器网络多跳路由和拓扑易变的特点, 提出了适用于无线传感器网络的动态电压调节算法 FB-DVS. 并在仿真试验中表明, 该算法可以节约高达 80% 的能量, 有效地延长无线传感器网络的生命周期.

2 模型建立

为了更好地表述算法各组成单元的功能,对 FB-DVS 算法进行数学建模. 建立模型之前,首先对处理器频率做归一化处理: 假设节点处理器的频率范围为 $[f_{\min}, f_{\max}]$, 令规划参数 $\alpha = f/f_{\max}$, 则归一化后的处理器频率范围为 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, 并且有 $\alpha_{\min} = f_{\min}/f_{\max}, \alpha_{\max} = 1$. 建立的具体模型如下:

(1) 节点任务模型

无线传感器网络的单个节点的任务可表示为: $T_i(\beta_i, C_i, P_i, \gamma_i)$. 其中, β_i 为任务等级参数, 当 $\beta_i = 1$ 时, 表示任务 τ_i 为紧急任务, 需要处理单位以最大速率进行处理, 不进行 DVS 调节; 当 $\beta_i = 0$, 则表示 T_i 为一般性任务, 对节点应用 DVS 算法. C_i 表示最糟处理时间 (Worst-Case Execution Time), P_i 表示任务 T_i 出现周期, γ_i 表示该节点距离 SINK 节点的距离. 根据无线传感器网络的特点, 可以得出以下假设: 当节点距离 SINK 节点越近, 任务负载越重, 进入休眠的时间相对较短, 进入 DVS 调节的时间相对较长; 反之, 任务负载越轻, 休眠时间越长, DVS 调节时间周期越短.

(2) 执行时间模型

为了满足无线传感器网络的实时性需求, 在模型中采用 EDF (Earliest Deadline First) 调度, 即截止时间最早的任务将优先进行调度. 引入规划参数 α , 则修正后的 EDF 规划模型为

$$\alpha^{-1} \frac{C_k}{P_k} + \sum_{i \in \{1, \dots, n | i \neq k\}} \frac{C_i}{P_i} \leq 1 \quad (1)$$

当且仅当式(1)成立, 所选的规划参数 α 才能保证各个任务在各自截止时间内完成. 将任务 C_k 分裂为 2 个子任务: C_{kA} 和 C_{kB} . C_{kB} 为最大处理速率 f_m 下的执行时间, C_{kA} 为规划后的处理时间, s_k 为任务 C_k 能够使用的空闲时间, 则有

$$C_k = C_{kA} + C_{kB} \quad (2)$$

$$C_k = s_k = \frac{C_{kA}}{\alpha} + C_{kB} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知

$$\alpha = \frac{C_{kA}}{C_{kA} + s_k} \quad (4)$$

由式(4)可知, 规划参数 α 的选择不仅与可用的空闲时间 s_k 有关, 还与分配的任务执行时间 C_{kA} 有关. 为了保证不错过任务的截止时间, 当前任务被中断时最保守预留时间为:

$$ET_{ij} = C_{ij} - c_{ij} \times \alpha \quad (5)$$

式中, c_{ij} 为实际执行时间. 当前任务为下一任务所

留的未使用的时间为

$$s_{k,r} = s_k - ET_{ij} \quad (6)$$

假设 CPU 进入空闲状态当做是执行空任务, $t_{\text{idle}}(d_k, d_{k+1})$ 为执行空任务的时间和, 则下一任务所能够使用的空闲时间段为

$$s_{k+1} = s_{k,r} + t_{\text{idle}}(d_k, d_{k+1}) \quad (7)$$

(3) 能量消耗模型

COMS 集成电路的功耗由动态功耗和静态功耗组成:

$$\text{Energy} \propto CV_{\text{dd}}^2 + V_{\text{dd}} I_{\text{leak}} \Delta t \quad (8)$$

式中, V_{dd} 为供电电压, I_{leak} 为漏电电流. 相比于动态功率, 静态功率通常非常小, 可以忽略不计, 因此有 $\text{Energy} \propto CV_{\text{dd}}^2$. 与此同时, 降低供电电压的同时也延长了门限延时:

$$\text{Delay} = k \frac{V_{\text{dd}}}{(V_{\text{dd}} - V_t)^2} \quad (9)$$

因此在实际应用中需要在动态电压调节削减能耗和门限延时之间进行平衡.

(4) PID 反馈控制模型

使用 PID 反馈控制模型减少分配时间 C_{iA} 与实际执行时间 c_{ij} 之间的误差. 为了节省资源, PID 周期性检验误差值. 由于负载与 γ_i 成反比, 则检验周期 $p(\gamma_i)$ 可以根据 γ_i 来设置. 令误差为

$$\epsilon(t) = c_{ij} - C_{iA} \quad (10)$$

建立的 PID 模型为

$$\Delta \epsilon(t) = K_p \epsilon(t) + \frac{1}{K_I} \int \epsilon(t) dt + K_D \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (11)$$

$$C_{A(j+1)} = C_{A(j)} + \Delta \epsilon(t) \quad (12)$$

3 FB-DVS 算法的建立

3.1 算法建立前提

无线传感器网络的重要特点^[5]之一就是多跳路由. 在无线传感器网络中节点通信距离有限, 一般只能和它的邻近节点直接通信. 如果需要与节点射频覆盖范围之外的节点进行通信, 则需要中继节点进行路由. 无线传感器网络的另外一个特点是拓扑易变性. 环境因素或能量耗尽使得节点失效或出现故障, 或者新节点的加入或节点休眠, 都可能导致网络的拓扑结构发生变化. 网络中节点距离 SINK 节点越近, 被选择作为中继节点的可能性越大, 相应的任务负载量也越重.

3.2 动态电压调节算法 (FB-DVS)

FB-DVS 算法的核心思想就是利用无线传感器网络节点的任务负载不均匀性动态调整算法反馈环

节的时间区间,在满足实时性的前提下根据节点负载动态调节节点的工作频率和电压,通过反馈机制对规划时间进行修正,以达到节约能耗的目的。

在算法中假设任务集由 n 个任务组成 $(T_1, T_1, \dots, T_n)$, 第 i 个任务 T_i 用 $T_i(\beta_i, C_i, P_i, \gamma_i)$ 表示, 它所对应的截止时间为 d_i ; T_{ij} 表示任务 T_i 第 j 次出现, 任务 T_{ij} 释放时间为 $P_i \times (j-1)$, 截止时间为 $P_i \times j$; 定义 T_{pk} 为在 T_{ij} 之前执行的任务. 在初始化状态下, $C_{kA} = C_k/2$, $ET_{k0} = C_k$, $s_k = 0$; 使用率 $U = C_1/P_1 + C_2/P_2 \dots + C_n/P_n$. 实际上, C_{kA} 理论上初始化值可以为 $[0, C_k]$ 之间的任何值. 这是因为由于反馈机制可以校正 C_{kA} 尽可能地接近实际执行时间 c_{ij} , 一般初值取 50% 的最糟执行时间. 具体算法如下:

S1: 检测 β_i 的值. 若 $\beta_i = 1$, 则 $\alpha \leftarrow \alpha_m$ (通常情况下 $\alpha_m = 1$), $C_A \leftarrow 0$, 进入 S7; 若 $\beta_i = 0$, 进入 S2;

S2: 如果节点已经休眠时间 t , 则当前任务的可用时间为 $s_k \leftarrow s_k - t$; 否则, 进入 S3;

S3: 如果任务 T_{pk} 被中断, 则 $ET_{pk} \leftarrow C_p - C_{pk} \times \alpha$, $s_k \leftarrow s_k - t_{idle}(d_{pk}, d_{ij})$. 若预留时间 ET_{pk} 大于可用时间 s_k , 则需做如下处理: $ET_{pk} \leftarrow ET_{pk} - s_{pk}(\text{now}, d_{pk})$, $s_k \leftarrow s_k - ET_{pk}$; 进入 S4;

S4: 根据 C_{Aij} 和 s_k 选择满足条件的最小规划参数 $\vartheta \leftarrow \min \left\{ \frac{f_i}{f_m} \geq \frac{C_{Aij}}{C_{Aij} + s_k} \right\}$; 根据得到的规划参数设置 $C_{Aij} \leftarrow s_k \times \alpha / (1 - \alpha)$; 进入 S5;

S5: 进入 PID 反馈修正环节, $\epsilon \leftarrow c_{ij} - C_{Aij}$, $\Delta\epsilon \leftarrow K_p \epsilon(t_i) + \frac{1}{K_i} \sum_{rw} \epsilon(t_1) + K_D \frac{\epsilon(t_i) - \epsilon(t_i - DW)}{DW}$, $C_{A(j+1)} \leftarrow C_{Aij} + \Delta\epsilon$; 进入 S6;

S6: 下次任务可用的执行时间 $s_k \leftarrow s_k - c_{ij} + C_i$; 进入 S7;

S7: 根据规划参数选择节点的工作频率 $f \leftarrow \alpha \times f_m$.

3.3 代码实现

if $\beta_i = 1$ then

$\alpha \leftarrow \alpha_m$

else if $\beta_i = 0$ then

TaskAct()

if processor was idle for t_{idle} then

$s_k \leftarrow s_k - t_{idle}$

if T_{pk} interrupted then

$ET_{ij} \leftarrow C_{ij} - c_{ij} \times \alpha$

$s_{k,r} \leftarrow s_k - t_{idle}(d_k, d_{k+1})$

if $ET_{ij} < s_k$ then

$s_k \leftarrow s_k - ET_{ij}$

else $s_k \leftarrow 0$

if now $> d_{pk}$ then

$s_k \leftarrow s_k + t_{idle}(d_k, d_{k+1})$

$\alpha \leftarrow \min \left\{ \frac{f_1}{f_m}, \dots, \frac{f_m}{f_m} \mid \frac{f_i}{f_m} \geq \frac{C_{Aij}}{C_{Aij} + s_k} \right\}$

if ($\alpha = 1$) then

$C_{Aij} \leftarrow 0$

else $C_{Aij} \leftarrow s_k \times \alpha / (1 - \alpha)$

TaskCompleted()

$s_k \leftarrow s_k - c_{ij} + C_i$

$\epsilon \leftarrow c_{ij} - C_{Aij}$

$\Delta\epsilon \leftarrow K_p \epsilon(t_i) + \frac{1}{K_i} \sum_{rw} \epsilon(t_i) +$

$K_D \frac{\epsilon(t_i) - \epsilon(t_i - DW)}{DW}$

$C_{Aij} \leftarrow C_{Aij} + \Delta\epsilon$

SetFreq()

$f \leftarrow \alpha \times f_m$

3.4 实例

假设节点的任务集由三个子任务 $T_1 = \{3, 8\}$, $T_2 = \{3, 10\}$, $T_3 = \{1, 14\}$ 以及空任务组成 $I = \{1, 4\}$; 各个任务的截止时间等于任务本身的周期, 即 $d_{ij} = P_i$; 优先级参数设置为 $\beta_i = 0$, 即所有任务需要进行 DVS 调节. 如图 1 所示, 任务 $T_{1,0}$ 第一个被规划, 所以传递给 $T_{1,0}$ 空闲时间和空任务均为 0, 因此 $s_{1,0} = 2$. 初始化 $C_A = 1.5$, 由式(4)可知 $\alpha = 0.428$, 节点 CPU 工作频率设置为 $0.5f_m$; 反馈环节对 $T_{1,0}$ 的 C_A 进行修正, $T_{1,0}$ 实际执行时间只消耗 4 个周期, 所以传递 1 个周期的空余时间给 $T_{2,0}$, 再加上 $T_{2,0}$ 本身 1 个空任务时间, 则 $s_{2,0} = 2$, $C_A = 0.67$, 由式(4)可知规划参数 $\alpha = 0.25$, 工作频率为 $0.25f_m$. 对于后续的任务, PID 反馈机制使得 C_A 尽可能地接近任务实际执行时间, 任务集能够以较低的频率完成.

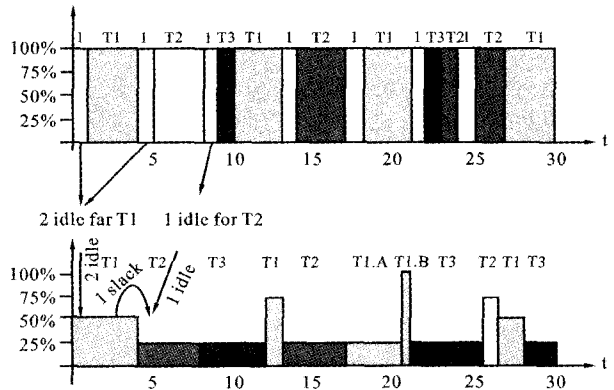


图1 任务集的FB-DVS算法规划

4 仿真与分析

为了验证 FB-DVS 的节能效果,特别设计了实验,并在 MATLAB 上仿真.为了使实验结果具有普遍性,在仿真中对无线传感器网络节点的工作频率做归一化处理,工作频率、工作电压以及相应的能量消耗关系文献[6]如表 1 所示.无线传感器网络的节点分布在以 SINK 节点为圆心的圆形区域内(图 2 所示),并随机选取半径不同的无线传感器网络节点作为本次仿真的研究对象,在反馈环节中一般可以选取 PID 系数.

表 1 处理器可用频率和电压值

归一化频率/MHz	电压/V	消耗能量/%
1.000	1.65	1.000
0.857	1.60	0.806
0.714	1.50	0.590
0.571	1.40	0.411
0.428	1.25	0.246
0.286	1.10	0.127

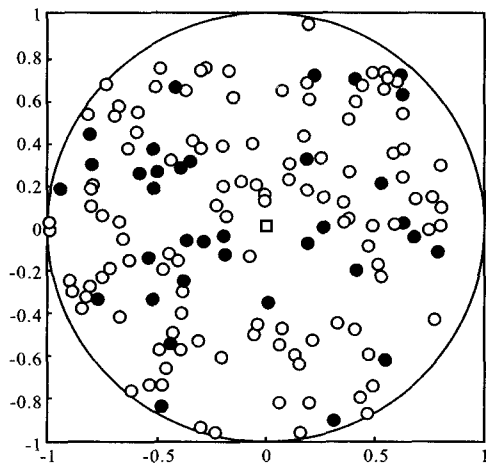


图 2 WSNs 节点分布图

Look ahead RT-DVS^[7]是由 Pillai 和 Shin 提出来的基于 EDF 优先原则的动态电压调节算法,在满足周期性任务实时性需求下表现出良好的能效性. DVSST^[8]则是 Qadi 等针对零星任务提出的动态电压调节算法,假设任务间没有资源互用,能够应用于适合无线传感器网络非密集任务的情况下.对比 Look ahead RT-DVS、DVSST 和 FB-DVS 算法在 3 个子任务时的能量消耗对比图(图 3 所示),当使用率小于 0.3 时,三种 DVS 算法都能节约近 80% 的能量.这是由于在使用率较低的情况下,通常有较多空任务和可用时间,所有的任务都能在较低的频率

下完成.随着使用率的增加 FB-DVS 表现出优越性,比另外两种算法多节约 8%—24% 的能量,表现出更好的能效性.

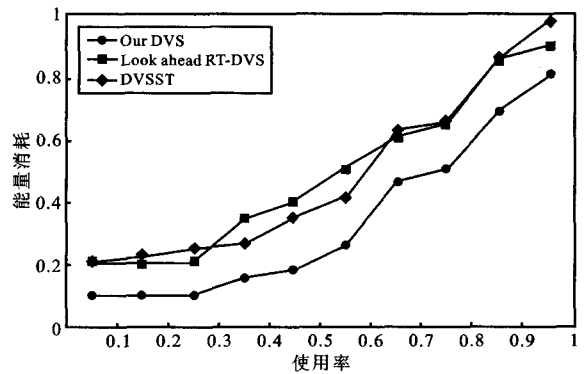


图 3 FB-DVS 算法和其他 DVS 算法的能量消耗对比

图 4 对比了 FB-DVS 算法在分别在 3 个子任务、10 个子任务以及 15 个子任务的能量消耗.任务集由子任务按一定的顺序组成,子任务越多也就意味着无线传感器网络节点需要处理的任务集越复杂.图 4 可以看出 FB-DVS 算法在相同使用率的情况下,3 个子任务比 10 个子任务和 15 个子任务消耗更少的能量;当使用率低于 0.3 时,3 个子任务的能量消耗最少,最多可节约 90% 左右的能量,10 个子任务和 15 个子任务能量消耗近乎相等,节约近 70% 的能量. FB-DVS 算法能够应用简单任务集和复杂任务集条件下节约无线传感器节点的能量消耗.

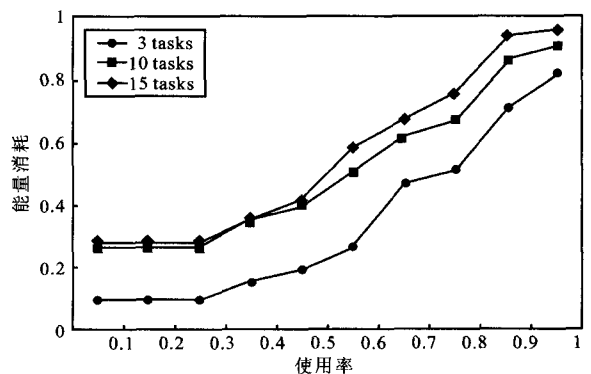


图 4 在不同子任务组成 FB-DVS 算法的能量消耗对比

5 结束语

动态电压调节技术允许无线传感器网络节点在运行时根据自身负载变化,动态调节处理器的工作频率和电压,在不影响系统性能的情况下减少节点的能耗,适用于实时性要求较高的系统中.文中建立包含任务中断的执行时间模型和 PID 反馈控制模型,结合无线传感器网络多跳路由和拓扑易变性特

点,根据节点任务负载的不均匀性提出一种适用于无线传感器网络的 FB-DVS 算法.该算法通过 EDF 策略保证任务的实时性,并在反馈环节中根据已经执行完毕的历史数据对当前任务的执行时间进行修正,在保证整体任务实时性需求的前提下无线传感器网络节点工作在较低的频率和电压,从而减少节点能量消耗,延长无线传感器网络的生命周期.

参考文献:

- [1] 龚本灿,李腊元.基于生成树的无线传感器网络分布式路由协议[J].微电子学与计算机,2008,25(11):77-80.
- [2] 闵林,王飞飞,郭拯危,等.一种能量有效地无线传感器网络路由算法[J].微电子学与计算机,2010,27(5):66-69.
- [3] YC Lee, AY Zomaya, Minimizing energy consumption for precedence-constrained applications using dynamic voltage scaling[C]// Proceedings of 2009 9th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid, Washington, DC USA; IEEE, 2009:92-99.
- [4] Chandrakasan A, Sheng S, Brodersen R. Low power cmos digital design[J]. IEEE Journal of Solid-State

Circuits, 1992(27): 473-484.

- [5] 王雪.无线传感器网络测试系统[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [6] Pouwelse J, Langendone K, sips H. Dynamic voltage scaling on a low-power microprocessor[C]// The Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Italy: ACM ISBN, 2001:251-259.
- [7] Pillai P, Shin K. Real-time dynamic voltage scaling for low-power embedded operating systems[C]// Proceedings of the eighteenth ACM symposium on Operating systems principles. USA: ACM, 2001:89-102.
- [8] Qadi A, Goddard S, Farritor S. A dynamic voltage scaling algorithm for sporadic tasks[C]// Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time Systems Symposium. CanCun, Mexico: IEEE, 2003:52-62.

作者简介:

魏图明 男,(1985-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络能耗问题.

余思佳 女,(1978-),博士,讲师.研究方向为先进制造技术、制造业信息化理论及实践.

魏海龙 男,(1986-),硕士研究生.研究方面为无线传感器网络功耗管理.

(上接第22页)

- [2] Vicisano L, Rizzo L, Crowcroft J. TCP-like congestion control for layered multicast data transfer[C]// Proceedings IEEE INFOCOM, San Francisco, CA, Mar; IEEE, 1998:996-1003.
- [3] Byers J, Frumin M, Horn G, et al. FLID-DL: congestion control for layered multicast[C]// Proceedings of NGC 2000 on Networked Group Communication. NY, USA: ACM Press, 2000:71-81.
- [4] Sisalem D, Wolisz A. Mlda: a TCP-friendly congestion control framework for heterogeneous multicast environments[C]// IEEE Eighth International Workshop on Quality of Service (IWQoS 2000), Pittsburgh: IEEE, 2000:65-75.
- [5] 石念,陈向东,罗雪松.语音编码中的模糊增量调制算法[J].微电子学与计算机,2008,25(7):190-194.

- [6] 朱怀宏,姜永兵.一种基于块编码的压缩视频通信差控算法[J].微电子学与计算机,2008,25(9):69-71.

- [7] Padhye J, Firoiu V, Tow sley D, et al. Modeling TCP throughput: a simple model and its empirical validation [C]// Proceedings of ACM SIGCOMM '98. Vancouver, Canada: ACM, 1998:303-315.

- [8] NS: Network Simulator[EB/OL]. [2010-07-29]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

作者简介:

张牧 男,(1980-),博士,副教授.研究方向为计算机网络.

王攀 男,(1979-),博士研究生.研究方向为下一代网络关键技术.