

文章编号: 1001-0920(2006)04-0453-04

应用 PSO 优化基于分簇的无线传感器网络路由协议

梁英^{1,2}, 于海斌¹, 曾鹏¹

(1. 中国科学院 沈阳自动化所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 分簇路由算法对大规模无线传感器网络远程监控系统具有较好的适应性和节能性, 但现有算法在确定簇首过程中由于忽略了邻居节点的状态信息, 容易导致簇内节点过早的出现盲节点现象, 从而降低网络的生存时间. 针对现有分簇算法的不足, 提出了应用 PSO 算法优化分簇过程. 仿真结果表明算法的性能得到了较好的改善, 并有效地避免了盲节点现象的过早发生.

关键词: 粒子群算法; 无线传感器网络; 路由协议; 分簇

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Optimization of Cluster-based Routing Protocols in Wireless Sensor Network Using PSO

LIANG Ying^{1,2}, YU Hai-bin¹, ZENG Peng¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China. Correspondent: LIANG Ying, E-mail: liangying@sia.ac.cn)

Abstract: Cluster-based routing protocols have the good adaptability for the remote monitoring of large-scale wireless sensor network. But the existing algorithms are prone to lead nodes in clusters to die early due to ignoring the state of neighbors in the process of cluster-heads decision. A new cluster-based algorithm using PSO is proposed to optimize clustering process. The election of cluster-heads needs synthetically consider the state information including location and energy reserved about candidates and their neighbors. The simulation results show that our protocol improves the performance and efficiently delay the occurrence time of dead nodes, and thus prolongs the network lifetime.

Key words: Particle swarm optimization; Wireless sensor network; Routing protocol; Clustering

1 引言

无线传感器网络(WSN)由大量密集部署在监控区域的微型廉价低功耗传感器节点构成, 通过无线通信方式形成一个多跳的无线网络系统^[1]. WSN 具有监测精度高、容错性高、覆盖区域大等显著优点, 在军事、环境监测、工业控制和城市交通等领域有广泛的应用前景, 特别适合部署在恶劣环境和人员不宜到达的远程监控场所.

与传统的无线自组织(Ad-hoc)网络不同, WSN 节点通常是带有有限的、不可更换的电源, 其自身的

计算、通信、存储能力也非常有限, 因此, WSN 路由协议必须以节约能源和提高网络生存时间为主要目标. 针对大规模 WSN 远程监控系统, 基于分簇的路由算法相对平面路由算法具有很好的适应性和节能性^[2]. 但目前大多数路由算法在成簇过程中仅仅根据候选节点的状态信息选择簇首, 由于忽略了周围邻居节点的状态信息, 导致簇内节点易出现盲节点现象, 从而降低网络的生存时间.

本文提出基于粒子群算法(PSO)的分簇路由协议, 在充分考虑了簇内邻居节点的能量和距离分布

收稿日期: 2005-01-27; 修回日期: 2005-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60434030, 60374072).

作者简介: 梁英(1976—), 女, 沈阳人, 博士, 从事计算机网络路由协议的研究; 于海斌(1964—), 男, 黑龙江密山人, 研究员, 博士生导师, 从事传感器网络、工业通信等研究.

信息的前提下优化簇首的选择, 该算法能够较好地避免盲节点现象的过早发生并有效降低系统能量的损耗。

2 问题描述

在大规模的传感器网络环境中, 为了提高网络的可扩展性, 延长网络的生命周期, 通常采用基于分簇机制的路由协议。分簇路由协议中, 网络通常被划分为簇, 每个簇由一个簇首和多个簇成员组成, 这些簇首形成高一级的网络, 在高一级的网络中, 还可以分簇, 再次形成更高一级的网络, 直至最高级, 如图 1 所示。

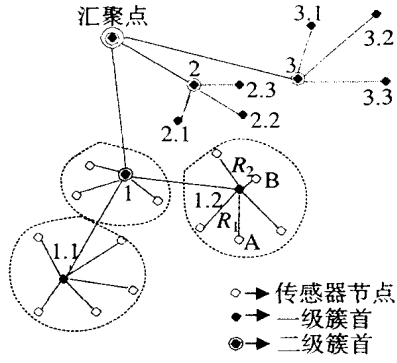


图 1 分簇路由算法示意图

分簇路由算法中, 簇首节点不仅负责所管辖簇内信息的收集和融合处理, 还负责簇间数据的转发, 因此簇首的确定十分重要。目前典型的分簇路由算法, 如 LEACH^[2], TEEN^[3], PEGASIS^[4], HEED^[5] 等都从节能的角度侧重解决了不同的问题, 但上述算法在选择簇首时仅仅根据候选节点的状态信息确定是否为簇首, 并没有综合考虑周边邻居节点的状态。当邻居节点间呈现能量不均衡的情况时, 远离簇首的邻居节点与簇首通信时会消耗更多的能量, 若此时该节点的剩余能量有限, 那么这种情况下该节点很快便耗尽现存能量成为盲节点, 盲节点的频繁出现会降低网络平均生命周期并导致路由协议的低效, 图 1 中簇 1.2 说明了这种情况。

在簇 1.2 中, 设簇内节点 A 至簇首节点的距离为 R_1 , 能量为 E_A , 节点 B 至簇首节点的距离为 R_2 , 能量为 E_B , 且有 $E_B \gg E_A, R_1 > R_2$ 。由于通信所耗能量 E_T 同到达目标的距离平方成正比^[2], 显然有 $E_B - E_{TB} \gg E_A - E_{TA}$, 因此可以看到簇内节点的能量损耗不均衡, A 节点会有较高的概率提前成为盲节点。若分簇算法在选择簇首节点时能够充分考虑其邻居节点的能量及距离分布情况, 例如将簇首节点更靠近节点 A, 则能有效地降低盲节点的出现概率并进一步提高网络的生命周期。为了解决上述问题, 需要优化簇首的选择机制。

在优化问题中, 主要解决两个问题: 一是寻找全局最优解; 二是寻找全局最优解时, 要有较高的收敛速度。PSO 是一种新兴的智能优化方法, 具有收敛速度快、算法简单、易于实现等优点, 在求解单目标优化问题上已证明是一种有效的方法, 而且也成功地应用于许多实际的工程领域中^[6,7]。本文以簇内节点能量损耗均衡化为出发点, 提出一种基于 PSO 算法的分簇路由协议, 通过优化簇首的选择来避免某些节点的过快能量损耗, 从而降低盲节点的出现概率。

3 PSO 算法概述

PSO 是一种进化算法, 由 Eberhart 等^[8]发明。算法源于对鸟群捕食行为的研究: 一群鸟在随机搜索食物, 在特定区域里只有一块食物, 所有的鸟都不知道食物在那里, 但是他们知道当前的位置离食物还有多远。那么找到食物的最优策略是什么呢, 最简单有效的方法就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域, PSO 从这种模型中得到启示并用于解决优化问题。在 PSO 中, 每个优化问题的解都是搜索空间中的一只鸟, 称为“粒子”, 所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值, 每个粒子还有一个速度决定他们飞翔的方向和距离。然后粒子们追随当前的最优粒子在解空间中搜索。

PSO 是一种基于叠代的优化算法。系统初始化为一组随机解, 然后通过叠代找到最优解。在搜索过程中, PSO 结合本地及全局信息, 不但根据自身的历史信息而且综合利用群体中邻居粒子的相关信息来调整当前位置, 从而通过迭代搜索求得最优解。在每次叠代过程中, 粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己: 第一个是粒子本身所找到的最优解, 这个解叫做个体极值; 另一个是整个种群目前找到的最优解, 这个极值是全局极值。另外也可以不用整个种群而只是用其中一部分作为粒子的邻居, 那么在所有邻居中的极值就是局部极值。

在找到这两个最优值时, 粒子根据如下的公式来更新其速度和新位置:

$$V_{id} = W V_{id} + c_1 \text{rand}() (P_{id} - X_{id}) + c_2 \text{Rand}() (P_{gd} - X_{id}), \quad (1)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id}. \quad (2)$$

其中: V_{id} 为粒子 i 的速度; X_{id} 为粒子 i 的位置; P_{id} 为粒子 i 在前一个位置时的个体位置极值; P_{gd} 为群体的全局位置极值; $\text{rand}()$ 和 $\text{Rand}()$ 是值域为 $[0, 1]$ 的随机函数; c_1 和 c_2 为一个正的常数值, 称为加速系数, 用于控制粒子的移动速度; W 为指定的权重系数, 用于控制粒子的历史值影响当前值的程度, 较大的权重系数可指导群体加大向新的区域进行搜索的

力度,而较小的权重系数可指导群体在当前区域进行细微的搜索^[9]。

4 基于 PSO 优化的分簇路由算法

基于 PSO 优化的分簇路由算法首先需要网络进行簇的初步划分,然后利用 PSO 算法综合邻居节点的状态信息优化选择簇首,最后将确定的簇首信息发布到整个簇内。

(1) 簇的初步形成阶段。

此阶段可采用各种分簇算法(如 LEACH 算法)对无线传感器网络进行簇的初步划分,经过该阶段簇首及簇基本确定,但形成的簇存在易于出现盲节点的问题。此阶段形成的各簇的簇首称为辅助簇首。

(2) 辅助簇首收集簇内节点状态信息阶段。

簇内各邻居节点将自身节点的位置、能量状态信息传递给辅助簇首。此时在辅助簇首内存入了邻居节点的位置信息 $P\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 及能量信息 $E\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 其中 n 为簇内的节点数量, p_i 为第 i 个节点的位置值, e_i 为第 i 个节点的能量值。

(3) 应用 PSO 算法优化并确定簇首阶段。

该阶段为优化算法的核心,为了使 PSO 算法适合本问题域必需改造上述 PSO 算法中提及的公式(1)和(2),同时给出相应的适值函数 $f(x)$ 。

搜索在网络平面内进行,因此速度是矢量,不仅有大小而且具有方向,即存在 x 和 y 方向上的速度分量,因此有

$$V_{xid} = WV_{xid} + c_1 \text{rand}() (P_{id} - X_{xid}) + c_2 \text{Rand}() (P_{gd} - X_{xid}), \quad (3)$$

$$V_{yid} = WV_{yid} + c_1 \text{rand}() (P_{id} - X_{yid}) + c_2 \text{Rand}() (P_{gd} - X_{yid}). \quad (4)$$

同理存在 x 和 y 方向上的位置分量,有

$$X_{xid} = X_{xid} + V_{xid}, \quad (5)$$

$$X_{yid} = X_{yid} + V_{yid}, \quad (6)$$

由于无线传感器网络内节点的分布是离散的,因此节点按式(5)和(6)所计算的值无法一一映射到相应的网络节点,需要对求得的位置进行调整,使调整后的 $X_{xid} \in \{p_{x1}, p_{x2}, \dots, p_{xn}\}$, $X_{yid} \in \{p_{y1}, p_{y2}, \dots, p_{yn}\}$, 其中 p_{xi} 为簇内第 i 个节点的 x 分量, p_{yi} 为簇内第 i 个节点的 y 分量。

令 $\Delta p_{xj} = \hat{u}X_{xid} - p_{xj}\hat{u}$, $\Delta p_{yj} = \hat{u}X_{yid} - p_{yj}\hat{u}$, $\Delta p_j = (\Delta p_{xj})^2 + (\Delta p_{yj})^2$ 。其中 Δp_{xj} 表示 X_{xid} 与簇内网络节点 j 的 x 分量差的绝对值, Δp_{yj} 表示 X_{yid} 与簇内网络节点 j 的 y 分量差的绝对值, 设 $\Delta p_k = \min\{\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n\}$, 则表明在网络中第 k 个节点的位置同 X_{id} 最为接近, 因此调整后的值为 $X_{xid} \approx p_{xk}$, $X_{yid} \approx p_{yk}$, 即搜索点现在位于节点 k 的位置上。

适值函数的确定同问题域的特点密切相关, 节点的适值不仅要考虑本身能量的大小而且应该反映周围节点的能量分布, 距离该节点越远的邻居节点其能量也应该越大, 相反距离该节点越近的邻居节点应具有较小的能量, 根据此特点构造的适值函数为

$$f(k) = \eta_k + \lambda \bar{e}.$$

其中: η_k $\lambda = 1$ 且 η 和 $\lambda \in [0, 1]$; \bar{e} 为其他节点的等效平均能量; k 为当前网络节点号; η 为当前节点能量影响因子, λ 为邻居节点能量影响因子, 通过调整可以决定邻居节点对适值的贡献比例。

等效平均能量定义为 $\bar{e} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq k}^n \tilde{e}_i$, 其中 $\tilde{e}_i = f(e_i, r_i)$ 为第 i 个节点的等效能量, r_i 为第 i 个节点至当前节点 k 的距离, e_i 为节点 i 的剩余能量。 $f(e_i, r_i)$ 的构造应综合考虑节点 i 的剩余能量及至节点 k 的距离, 满足如下条件: 1) 若距离节点 k 较远, 节点 i 的能量较大则具有较大的函数值; 2) 若距离节点 k 较近, 节点 i 的能量较小则具有较大的函数值。

经筛选构造 $f(e_i, r_i) = e_i r_i / (r_i + 1)$, 该函数在仿真中证明可有效反应问题的特点, 综合上述各式经整理后可得适值函数

$$f(k) = \eta_k + \frac{\lambda}{n-1} \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{e_i r_i}{r_i + 1}. \quad (7)$$

至此给出详细的算法步骤如下:

Step1: 初始粒子群群体规模为 n (即簇内节点数)。

Step2: 对每个粒子 i 进行如下初始操作:

1) 随机初始化粒子 i 的 X_{xid} 和 X_{yid} , 并按上述提到的方法进行调整;

2) 随机初始化粒子 i 的 V_{xid} 和 V_{yid} ;

3) 通过适值函数公式(7) 计算适值 f_i ;

4) 使 $P_{gd} =$ 群体中的全局极大适值, $P_{id} = f_i$ 。

Step3: 重复下列步骤直到满足规定的循环次数或特定的结束条件:

1) 查找全局极大适值 P_{gd} ;

2) 对每个粒子 i 利用式(7) 计算适值 P_{id} ;

3) 对每个粒子 i 利用式(3) ~ (6) 更新 V_{xid} , V_{yid} , X_{xid} , X_{yid} , 并按照上述方法调整 X_{xid} 和 X_{yid} ;

4) 按式(7) 计算各粒子 i 的适值。

Step4: 选取具有较大适值的粒子所代表的节点为优化后的簇首。

(4) 优化簇的形成阶段。

该阶段辅助簇首节点将优化后的簇首信息发布给簇内节点, 实现优化簇首对簇内节点信息的收集

和融合. 由于优化簇的形成综合考虑了邻居节点的状态信息, 因此簇内节点的能量损耗得以均衡, 从而有效避免了盲节点的频繁出现.

5 仿真实验

5.1 仿真环境

在仿真实验中, 无线传感器网络由 100 个具有 GPS 定位功能的节点组成, 节点在模拟环境范围为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的区域内随机分布, 基站位于坐标 $(x = 50, y = 300)$.

本文采用 ns-2 网络仿真器, 利用文献[2] 的无线通信系统模型计算路由协议的能量损耗. 该模型由发送电路、功率放大器和接收电路构成, 如图 2 所示, 其中发送和接收电路的功耗为 $E_{\text{elec}} = 50\text{ nJ/bit}$, 放大电路的功耗为 $\epsilon_{\text{amp}} = 100\text{ pJ/bit/m}$. 当发送方传输 $k\text{ bit}$ 到距离为 d 的接收方时, 收发双方损耗的能量分别为

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-\text{dec}}(k) + E_{Tx-\text{amp}}(k, d) = E_{\text{elec}}k + \epsilon_{\text{amp}}kd^2, \quad (8)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-\text{elec}}(k) = E_{\text{elec}}k. \quad (9)$$

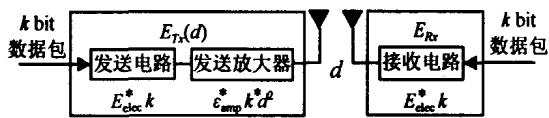


图 2 无线通信系统模型

无线传感器网络模型的主要参数为: 每个节点的初始能量是 0.5 J , 利用 LEACH 算法对网络进行初步划分, 每回合的簇重构过程中节点向其簇首发送的数据包为 2000 bit . 选取 PSO 算法的各参数值为: $\eta = 0.6, \lambda = 0.4, c_1 = c_2 = 2, W = 0.9, \text{rand}()$ 和 $\text{Rand}()$ 值在运行过程中动态地随机给出, 退出条件是迭代次数为 100 次.

为测试协议的节能性, 将基于 PSO 优化的分簇路由算法与典型的 LEACH 算法进行比较, 并使用如下的性能评价参数: 1) 网络生存时间: 仿真开始到最后一个节点耗尽能量所需的回合数(回合数 = 算法执行簇重构过程的次数). 2) 系统总能量损耗: 系统生存时间内所有节点能量损耗的总和(系统生存时间 = 20% 节点死亡所需的时间).

5.2 仿真结果和分析

图 3 反映了两种协议的网络生存时间, 可以看出, 本文提出的优化分簇算法比 LEACH 具有更长的网络生存时间, 其中第一个节点的死亡时间延迟了近 20%. 这是因为 LEACH 运行一段时间后, 网络内节点的剩余能量会出现不均衡状态, 而本文提出

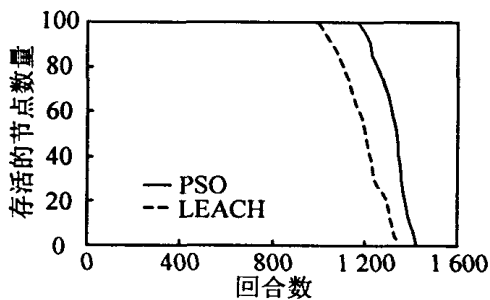


图 3 网络生存时间比较

的算法能够均衡簇内节点的能量损耗, 避免了盲节点的过早出现, 从而延长了网络的生存时间.

图 4 反映了随着网络半径的不断增大, 两种协议的系统总能量损耗. 可以看到在小半径网络内使用两种策略, 节点耗费的能量相差不多. 当网络的半径小于 50 m 时, 基于优化策略所耗费的总能量要略高于 LEACH. 这是因为小半径网络内节点间的距离很近, 由通信距离不同而引起的能量不均衡现象不很明显, 而且本文的分簇算法在确定优化簇首阶段需要耗费一定的能量进行迭代计算. 但是随着网络半径的不断增大, 节点的能量不均衡现象越来越明显, 优化分簇算法的节能性就明显高于 LEACH, 当网络半径为 100 m 时, 优化算法的能量损耗比 LEACH 降低了 15%.

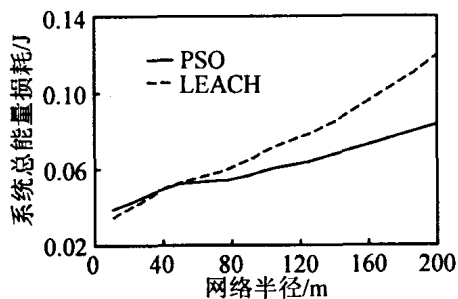


图 4 系统总能量损耗比较

6 结论

在无线传感器网络中, 路由协议的性能决定了网络的整体性能, 因此无线传感器网络路由协议一直是本领域的研究热点. 针对现有分簇算法的不足, 本文提出了应用 PSO 算法优化分簇的路由协议. 仿真实验证明, 该算法可有效避免一般分簇路由算法中易出现的盲节点现象, 有效地提高了大规模无线传感器网络的生命周期. 目前取得的研究结果主要是如何避免盲节点现象的出现, 而对各参数选择的相互影响问题研究的不够深入, 下一步将以此为工作重点展开深入的研究, 并将给出详细的对比数据.

6 结 论

研究了基于 Hammerstein 模型、同时考虑不确定性和输入饱和约束的两步法预测控制的稳定性, 得到了稳定性结果, 并给出了吸引域的计算和调整方法. 与文献[5]的方法相比, 两步法控制器更简单和易于实现. 进一步的研究方向为如何将 TSMPC 和文献[5]中的方法相结合, 这样不仅具有稳定性保证, 而且可以得到较大的吸引域.

参考文献(References)

- [1] Ding B C, Li S Y, Xi Y G. Stability Analysis of Generalized Predictive Control with Input Nonlinearity Based on Popov's Theorem [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 582-588.
- [2] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. Stability Analysis on Predictive Control of Discrete-time Systems with Input Nonlinearity[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(6): 827-834.
- [3] Ding B C, Li S Y, Xi Y G. Robust Stability Analysis of Predictive Controller for Systems with Input Nonlinearity[A]. *Proc ACC* [C]. Denver, 2003: 3626-3631.

- [4] Kim J H, Bien Z. Robust Stability of Uncertain Linear Systems with Saturating Actuators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 202-207.
- [5] Bloemen H H J, Van de Boom T J J, Verbruggen H B. Model-based Predictive Control for Hammerstein Systems[A]. *Proc IEEE-CDC* [C]. Sydney, 2000: 4963-4968.
- [6] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. On the Stability of Output Feedback Predictive Control for Systems with Input Nonlinearity[J]. *Asian J of Control*, 2004, 6(3): 388-397.
- [7] Lin Z, Saberi A, Stoorvogel A A. Semiglobal Stabilization of Linear Discrete-time Systems Subject to Input Saturation Via Linear Feedback - An ARE-based Approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41: 1203-1207.
- [8] Gilbert E G, Tan K T. Linear Systems with State and Control Constraints: The Theory and Application of Maximal Output Admissible Sets [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1991, 36(9): 1008-1020.

(上接第 456 页)

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks[A]. *IEEE Proc of the Hawaii Int Conf System Sciences* [C]. Washington: IEEE Computer Society, 2000: 175-187.
- [3] Manjeshwar A, Agrawal D. Teen: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks [A]. *Proc of the 1st Int Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing* [C]. New York: ACM Press, 2001: 304-309.
- [4] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems[A]. *Proc of the IEEE Aerospace Conf* [C]. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1-6.
- [5] Younis O, Fahmy S. HEED: A Hybrid, Energy-efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [6] Eberhart R C, Shi Y. Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization [A]. *Proc Congress Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE Press, 2000: 84-88.
- [7] Eberhart R C, Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources [A]. *Proc Congress on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE Press, 2001: 81-86.
- [8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [A]. *Proc of the IEEE Int Conf on Neural Networks* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [9] Salman A, Ahmad I. Particle Swarm Optimization for Task Assignment Problem [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2002, 26(8): 363-371.