

文章编号: 1001-0920(2007)01-0045-04

基于无线传感器网络的控制系统采样频率优化算法

毛剑琳, 吴智铭, 王四平

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 针对基于无线传感网的网络化控制系统, 讨论了采样频率的优化问题. 建立了以数字和模拟控制系统性能差距指数最低为目标, 以无线节点的通信容量为约束条件的非线性优化模型, 并以障碍函数法进行求解, 提出了基于节点缓冲区信息的分布式迭代算法. 该算法在传感节点的计算量小, 易于实现. 仿真表明该算法能有效收敛到系统的最优目标点, 并能适应于系统的负载变化.

关键词: 无线传感器网络; 网络化控制系统; 采样频率; 非线性优化

中图分类号: TP393.1; TP273

文献标识码: A

Optimization algorithm for sampling frequency assignment in wireless sensor network-based control system

MAO Jianlin, WU Zhi-ming, WANG Si-ping

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: MAO Jianlin, E-mail: jlmao@sjtu.edu.cn)

Abstract: A sampling frequency assignment problem is discussed in networked control systems which are based on wireless sensor network. The problem is formulated as a nonlinear optimization problem, whose objective function is to minimize the difference indexes between the digital and the analog control systems, subject to node communication capacity constraints. With a barrier function method, an iterative distributed algorithm based on local buffer information is then proposed. This algorithm has features of low computational complexity and good feasibility. Simulation results show that the frequency sequence generated by the iterative distributed algorithm can effectively converge to an optimal solution, and can adapt to the changes of system load.

Key words: Wireless sensor network; Networked control systems; Sampling frequency; Nonlinear optimization

1 引言

随着无线通信技术的不断成熟, 无线传感器网络与控制系统的结合成为网络化控制的一个新的发展方向. 在无线传感器网络中, 每个传感器节点都有无线通信的能力, 以分布式自组织的方式构成网络, 具有感知环境、自动收集数据的功能^[1]. 这样的网络可以节省布线成本, 具有部署安装的灵活性, 尤其在移动对象的控制方面更具广阔的应用前景.

对于基于无线传感器网络的控制系统而言, 所有分散在网络内部的控制闭环共享有限的网络通信资源, 如何分配有限的通信资源是一个很有现实意义的问题. 然而, 无线传感器网络的分布式特性和传输过程的无线多跳特性, 对此问题提出了新的挑战:

1) 无线通信节点的高度分散性; 2) 无线通信资源在

空间上的强耦合性. 这便使有效分配资源的问题变得更加复杂.

为解决无线传感器网络的通信资源分配问题, Liu 等^[2]针对码分多址网络, 基于效用优化的思想^[3,4], 以控制系统效用损失为目标, 以周期任务的可调度性为约束条件建立优化模型, 给出了集中式和分布式两种算法. Chen 等^[5]提出以流量、能量和节点通信容量为约束条件, 以最大化网络系统效用和网络生存时间为目标的优化问题, 并采用集中式算法, 在能力强大的终端运行 Matlab 来求解.

本文在时分复用的网络协议下, 建立了新的优化模型, 该模型以控制系统性能指标为优化目标, 以节点的通信容量为约束条件. 采用障碍函数法进行求解, 将节点的通信容量约束条件转换为用缓冲区

收稿日期: 2005-09-26; 修回日期: 2005-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074011).

作者简介: 毛剑琳(1976-), 女, 云南宣威人, 博士生, 从事无线传感器网络、网络化控制的研究; 吴智铭(1936-), 男, 江苏苏州人, 教授, 博士生导师, 从事混合动态系统、分布实时嵌入式系统等研究.

容量表达的障碍函数,易于问题的求解和算法的分布式实现.

2 问题描述和优化模型

2.1 问题描述

在基于无线传感器网络的控制系统中,传感器节点以采样速率通过网络向控制器发送传感数据,使得采样频率成为同时影响控制系统性能和网络性能的一个重要因素.如何确定传感器的采样和发送速率,使其在网络承载能力之内最大化控制系统的性能是本文要解决的问题.

为清晰地界定问题,以下给出问题的设定:1)传感节点以采样速率周期性地通过网络向控制器发送传感数据包,当所有节点均以最低频率工作时不会导致网络拥塞,以保证问题有解;2)控制器设置在执行器节点上,即二者之间的联系不占用无线通信资源;3)网络采用载波监听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)方案解决信道冲突.

2.2 优化模型

通过上节的优化问题描述,以控制系统的性能为优化目标,无线传感器节点的通信能力为限制条件,传感器采样频率为操作量,可得如下优化模型:

$$\min_{s=1}^M U_s(f_s) = \sum_{s=1}^M s e^{-s f_s}; \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} f < x, & (2) \\ f^{\min} < f < f^{\max}, & (3) \\ A_X < c^{\text{channel}}. & (4) \end{cases}$$

在优化模型(1)中, s 是传感器数据的传输任务; f_s 表示对于任务 s ,相应传感器节点的采样频率; s 是任务的权重值; $U_s(f_s) = \sum_{s=1}^M s e^{-s f_s}$ 是数字和模拟控制系统性能的差距指数^[6],即采样频率和数字控制系统性能的关系模型,其中 s 是放大系数, s 是衰减率.此式的物理意义是:反映了数字控制系统与相应的连续时间控制系统的控制性能差距,采样频率越低,二者的性能差距越大;反之,采样频率越高,数字控制系统的性能越接近连续时间控制系统的性能,性能差距越小.显然,目标函数值越小越好.此目标函数是关于采样频率的一个严格凸的且可微的单调递减函数.

在约束条件(2)和(3)中, f 和 x 分别为 f_s 和 x_s 的向量形式, x_s 表示任务 s 在网络中的传输速率.式(2)的含义是:各任务在网络中的传输速率不能小于相应传感器节点的采样频率,否则会有大量的传感数据得不到及时发送而堆积在传感节点处,造成节点缓冲区的阻塞.式(3)则给出了各控制任务的采样频率范围.

在约束条件(4)中, c^{channel} 是 c_n^{channel} 的向量形式,

表示节点的无线通信容量.式(4)的含义是:节点的通信负荷应小于等于该节点的通信容量,此值与无线网络的拓扑有关.由于节点采用分时复用的方式使用无线信道,在节点数为 N 任务数为 M 的网络中,节点负荷矩阵 $A_{N \times M}$ 定义为:当节点 i 在任务 j 的路由上时,对任务 j 的数据包的接收和转发,需占用2个时间单位的信道资源,故 $A_{ij} = 2$;依次类推,当节点 i 是任务 j 的源/终节点时, $A_{ij} = 1$;其他情况, $A_{ij} = 0$.

显然,由于问题(1)的目标函数是一个严格可微凸函数,约束集满足紧的(闭的和有界的)和凸的性质,所以问题(1)存在唯一最优解^[7].

3 基于缓冲区信息的分布式迭代算法 (IDALBI 算法)

3.1 带约束非线性规划问题的转化

采用障碍函数法对问题(1)进行求解.针对约束条件(4),引入连续可微障碍函数,满足条件:对于任意节点 i ,若节点的数据流量趋于饱和,即 $A_{ij} \times (j = 1, 2, \dots, M)$ 逼近 C_i^{channel} ,则该障碍函数将趋于无穷大.

在无线传感器网络中,当某节点的数据流量趋于饱和时,观察到在该节点所在的路由上,其上游节点将发生缓冲区溢出的情况.由此定义障碍函数 B_s ,使当任务的任一路由节点上的数据流量达到饱和时,该任务对应的障碍函数 B_s 将趋于无穷大.

$$B_s = \frac{1}{r_n R(s) \left(1 - r_n\right)^w} = \frac{1}{r_n R(s) \left(1 - \left(\frac{D_n(x_s)}{C_n^{\text{channel}}}\right) / C_n^{\text{channel}}\right)^w}, w > 1. \quad (5)$$

其中: r_n 是传感节点 n 的缓冲区占用率; $R(s)$ 是任务 s 的路由节点集合; $D_n(x_s)$ 是传感节点 n 在缓冲区内保存的任务 s 的数据包数量,此时任务 s 的传输率为 x_s ; $S(n)$ 表示与节点 n 有关的任务集合,包括流经节点 n 的任务和节点 n 本身产生的任务; C_n^{channel} 是传感节点 n 的缓冲区容量.当缓冲区饱和即 $r_n = 1$ 时,取 B_s 为非常大的数.

由障碍函数的表达式(5),带约束的非线性规划问题(1)便可转化为一个无约束非线性规划问题

$$\min Q(f) = \sum_{s=1}^M U_s(f_s) + \sum_{s=1}^M B_s, \quad (6)$$

$$s > 0, f_s \in [f_s^{\min}, f_s^{\max}].$$

3.2 优化问题的求解

根据无约束非线性规划的最速下降法,可得问题 Q 在 $[f^{\min}, f^{\max}]$ 上的解

$$f_s(i+1) =$$

$$\arg \min_{f_s^{\max} f_s f_s^{\max}} \left\{ f_s(i) - k_s \frac{\partial Q(f)}{\partial f_s} \Big|_{f_s=f_s(i)} \right\}. \quad (7)$$

其中: $k_s > 0, \forall s \in S$. 在此取 f_s 为约束条件(2) 的上限 x_s , 即 $f_s = x_s$, 令

$$h_s(i) = \frac{\partial}{\partial f_s} \left. \sum_{s=1}^M U_s(f_s) \right|_{f_s=f_s(i)} = \sum_{s=1}^M s e^{-s f_s(i)}, \quad (8)$$

$$g_s(i) = \frac{\partial}{\partial f_s} \left. \sum_{s=1}^M B_s \right|_{f_s=f_s(i)} = \sum_{s=1}^M \frac{\partial B_s}{\partial f_s} \Big|_{f_s=f_s(i)} = \sum_{n \in R(s)} \frac{w}{C_n^b} \left(\frac{1}{1-r_n} \right)^{w+1} \frac{d D_n(x_s)}{d x_s} \Big|_{x_s=x_s(i)}. \quad (9)$$

在此, 对 $\frac{d D_n(x_s)}{d x_s} \Big|_{x_s=x_s(i)}$ 采用差分形式

$$\frac{D_n[x_s(i)] - D_n[x_s(i-1)]}{x_s(i) - x_s(i-1)}$$

近似代替, 并定义 $E_s^n(i)$ 为第 i 个迭代周期流过节点 n 的任务 s 的数据包数量, T 是一个迭代周期的时间, 则 $x_s(i) = E_s^n(i) / T$. 于是有

$$g_s(i) = \sum_{n \in R(s)} \frac{w}{C_n^b} \left(\frac{1}{1-r_n} \right)^{w+1} \times \frac{D_n[x_s(i)] - D_n[x_s(i-1)]}{E_s^n(i) - E_s^n(i-1)} T = \sum_{n \in R(s)} g_s^n(i). \quad (10)$$

对于式(8)和(10), 有如下含义: 在第 i 个迭代周期内, $h_s(i)$ 是采样频率的变化所导致的控制系统性能差距指数的变化, $g_s(i)$ 可解释为任务 s 因其传感器采样频率的变化向所在路由付出的代价.

将式(8)和(10)代入式(7)中的 $\frac{\partial Q(f)}{\partial f_s}$ 项, 便可得到问题 Q 的迭代计算公式如下:

$$f_s(i+1) = \arg \min_{f_s^{\min} f f_s^{\max}} \left\{ f_s(i) + k_s \left(h_s(i) - \sum_{n \in R(s)} g_s^n(i) \right) \right\}. \quad (11)$$

3.3 IDALBI算法的分布式实现

对于上节的迭代公式(11), 注意到: 1) 变量 $f_s(i), k_s, s$ 和 $h_s(i)$ 只与任务 s 的源节点有关; 2) $g_s^n(i)$ 表达式(10)中的变量只与任务 s 的路由节点 n 有关, 其中 $C_n^b, r_n, D_n[x_s(i)]$ 和 $E_s^n(i)$ 可通过统计节点 n 的缓冲区信息而得到. IDALBI算法的实现思路为: 设计一个代价累计数据包(PAP), 对任务 s 在其路由节点的代价 g_s^n 进行收集和累加, 并将累加值 g_s^n 送到任务 s 的源节点. 根据式(11), 各任务的源节点便可独立进行最优频率的迭代求解.

IDALBI 算法在各节点的分布式实现如下:

1) 任务 s 的目的节点算法: 在每个迭代间隔开始时, 将 PAP 携带的累计代价值置为 0, 目标地址置为任务 s 的源节点, 对该数据包以最高优先级进行发送.

2) 任务 s 的路由节点算法: 在收到 PAP 数据包后, 按照式(10)中 g_s^n 的定义, 计算任务 s 在本节点的代价值, 并累加进 PAP 的累计代价, 然后向前一节点发送此数据包.

3) 任务 s 的源节点算法: 在收到 PAP 数据包后, 取出累计代价 $g_s^n(i)$, 根据式(11) 计算新的采样频率. 然后判断迭代终止条件 $|f_s(i) - f_s(i-1)|$ 是否成立 (ϵ 是足够小的正实数), 若成立, 则不再更新采样频率; 否则, 更新采样频率和数据包发送速率.

4 仿真结果

NS-2 是当前网络仿真的主要平台之一, 本文采用 NS-2 的 2.28 版本系统对 IDALBI 算法进行仿真实验. 仿真网络的结构如图 1 所示, 有 4 组传感器-控制器节点对, 其他传感节点作为路由. 网络数据传输率为 500 kbps, 节点缓冲区容量为 100 kbits, 迭代式中 $w = 2$. 控制闭环的参数设置为: $s = [1, 2, 3, 4], r_s = [0.89, 0.89, 0.89, 0.89], C_s = [0.71, 0.58, 0.5, 0.45]$. 传感器的采样频率范围为 2 ~ 40 Hz.

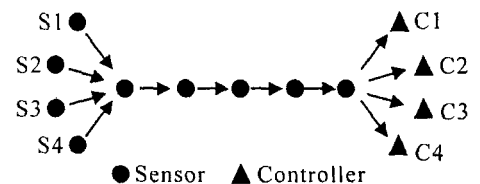


图 1 仿真网络结构

4.1 实验 1

实验 1 验证算法的收敛性和稳定性, 网络的初始负荷设置为最高负荷 40 Hz. 如图 2 所示, 目标函数值 $Q(f)$ 在 40 s, 200 s, 568 s 的值分别为 0.736, 0.039, 0.032, 最终为 0.032. 各传感器频率的稳定值为 [11.426, 14.573, 16.021, 17.418]. 结果显示:

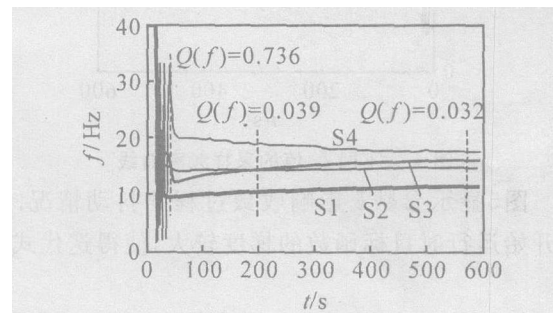


图 2 采样频率曲线 ($k_s = 25, \epsilon = 0.08$)

- 1) 算法能有效收敛并得到稳定的解,在该稳定解上目标函数 $Q(f)$ 值最小,即此时控制系统性能最优;
- 2) 该算法能有效消除网络高负荷时的拥塞状态,完成自动寻优的过程.

4.2 实验 2

实验 2 考察 IDALBI 算法对网络负荷变化的适应性,各传感器的频率均从 10 Hz 出发.图 3 显示在 400 s 前,4 个传感器的采样频率逐渐接近于平衡状态.在 400 s 后,由于加入新的 Sensor1 的任务,导致网络负荷突然增大,原来的资源分配方案被打破,5 个任务自动地重新分配网络资源,并达到新的平衡点 [7.55, 11.04, 13.65, 15.43, 16.18]. 结果表明 IDALBI 算法对网络负荷的变化具有较好的适应性.

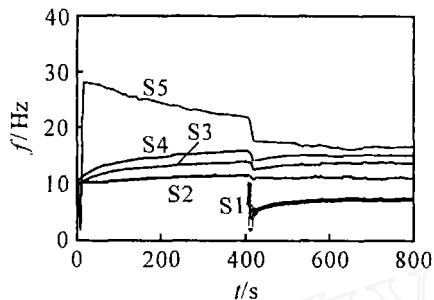


图 3 网络负荷增加时的采样频率曲线 ($k_s = 25, s = 0.2$)

4.3 实验 3

实验 3 考察参数 s 和 k_s 对系统运行结果的影响.图 4 显示 s 的变化对结果曲线的收敛效果和收敛值都有影响:随着 s 的增加,频率的稳定值减小,同时曲线在稳定频率点附近的波动逐渐加剧.这是因为, s 构造目标函数 $Q(f)$,当 f 小于等于稳定频率时, $Q(f)$ 是 f 的递减函数,所以稳定频率值 f .此外, s 越大,迭代式 (11) 对障碍函数的变化越敏感,从而加剧了平衡点附近的抖动.

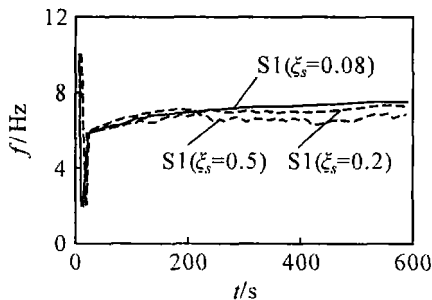


图 4 不同 s 值的采样频率曲线

图 5 显示参数 k_s 影响收敛过程的抖动情况.系统开始运行时目标函数的梯度较大,使得迭代式中

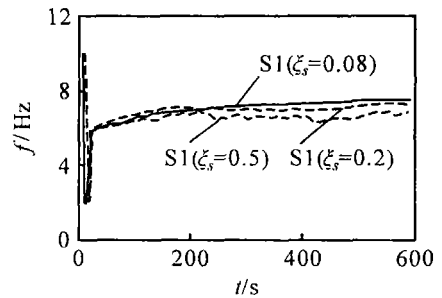


图 5 不同 k_s 值的采样频率曲线

k_s 值的作用较大,容易引起频率的抖动.随着优化过程的推进,目标函数的梯度不断减小, k_s 值的差别也逐渐消退,最后两条频率变化曲线几乎重合.

5 结 论

在基于无线传感器网络的控制系统中,如何为各控制闭环分配通信资源是一个重要问题.本文对此建立了以控制系统性能指标为优化目标,以节点通信容量为约束条件的全局优化模型,利用障碍函数将强耦合的约束条件转换成可量测的实际量,大大降低了运算复杂度.仿真实验验证了 IDALBI 算法的收敛性和稳定性.与集中式算法相比,该算法对网络负荷的变化具有良好的适应性,节点计算简单,易于在节点能力有限的无线传感器网络中实现.

参考文献(References)

- [1] John A Stankovic. Real-time communication and coordination in embedded sensor networks[J]. Proc of the IEEE, 2003, 91(7): 1002-1022.
- [2] Liu X, Wang Q X, Sha L, et al. Optimal QoS sampling frequency assignment for real-time wireless sensor networks[C]. Proc of the 24th IEEE Int Real-time Systems Symp. 2003: 308-319.
- [3] Low S H, Lapsley D E. Optimization flow control —I: Basic algorithm and convergence[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1999, 7(6): 861-875.
- [4] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control in communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability[J]. J of the Operational Research Society, 1998, 49(3): 238-252.
- [5] Chen W P, Sha L. An energy-aware data-centric generic utility based approach in wireless sensor networks[C]. 3rd Int Symp on Information Processing in Sensor Networks. 2004: 215-224.
- [6] Seto D, et al. On task schedulability in real-time control systems[C]. Proc of the 17th RTSS. 1996: 13-21.
- [7] Bertsekas D. Nonlinear programming [M]. Belmont: Athena Scientific, 1995.