

无线传感网中混合业务下的触发式流控制算法*

温书胜, 黄炯, 舒挺, 徐伟强, 汪亚明

(浙江理工大学 信息学院, 浙江 杭州 310018)

通讯作者: 黄炯, E-mail: hj_edu03@126.com

摘要: 无线传感器网络中, 节点所具有的能量和通信能力等都十分有限, 如何设计有效的协议及算法, 利用有限的资源高效地完成诸多任务, 成为无线传感器网络设计所面临的一大挑战. 考虑接收容量模型, 研究了无线传感器网络在节点接收容量和能量联合受限情况下, 面向混合业务时的效用公平流控制问题, 并针对传统对偶分解算法存在着收敛速度慢、步长不易调节、通信负荷大等缺陷, 进一步提出了基于事件触发的分布式求解算法. 理论分析与仿真验证均表明: 使用事件触发算法时, 传感节点的平均广播周期比使用对偶分解算法时大很多, 大幅度降低了无线传感器网络节点间的通信量, 减少了网络的通信开销. 仿真结果显示: 与对偶分解算法相比, 分布式事件触发算法具有收敛速度快、对网络规模扩展的适应性强等优势; 与传统的速率公平流控制机制相比, 所提的效用公平流控制模型能够更加适应弹性与非弹性业务共存的网络场景.

关键词: 无线传感器网络; 效用公平; 接收容量; 事件触发; 对偶分解

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

中文引用格式: 温书胜, 黄炯, 舒挺, 徐伟强, 汪亚明. 无线传感网中混合业务下的触发式流控制算法. 软件学报, 2013, 24(9): 2151-2164. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4351.htm>

英文引用格式: Wen SS, Huang J, Shu T, Xu WQ, Wang YM. Event triggered-based flow control algorithm for mixed traffic in wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(9): 2151-2164 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4351.htm>

Event Triggered-Based Flow Control Algorithm for Mixed Traffic in Wireless Sensor Networks

WEN Shu-Sheng, HUANG Jiong, SHU Ting, XU Wei-Qiang, WANG Ya-Ming

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Corresponding author: HUANG Jiong, E-mail: hj_edu03@126.com

Abstract: In wireless sensor networks, nodes commonly have limited energy and communication ability. Designing efficient protocols and algorithms to complete various tasks efficiently with limited resources has become a challenge in wireless sensor networks. Considering the receiver capacity and mixed traffic in wireless sensor networks, this paper investigate the utility fair flow control problem with joint power and receiver capacity constraints. Since conventional dual decomposition algorithms often have drawbacks such as slow convergence, difficult adjustment of stepsize and large communication overhead, this paper proposes an event-triggered distributed algorithm for the flow control problem studied in this paper. Both theoretical analysis and simulation results show that the average broadcast period of sensor nodes when using event triggered distributed algorithm is longer than that of dual decomposition. Compared with the dual decomposition algorithm, this event triggered distributed algorithm reduces the amount of information exchange among nodes, decreases the communication overhead in wireless sensor networks greatly. The simulation results also show that the event triggered distributed algorithm has a much faster convergence than the dual decomposition algorithm and the former has better scalability

* 基金项目: 国家自然科学基金(61272311, 61101111, 61070063); 教育部科学技术研究重点项目(212066); 浙江省自然科学基金(LY12F02042, LQ12F01009)

收稿时间: 2012-05-15; 定稿时间: 2012-11-15

to the network size. Additionally, compared with the conventional rate fair flow control mechanism, the utility fair flow control model can better cater for the networks scene with a mix of elastic and inelastic traffic.

Key words: wireless sensor network; utility fair; receiver capacity; event-triggering; dual decomposition

无线传感器网络由大量低功耗、多功能的传感器节点组成,这些传感器节点通常集成了信息采集、数据处理和无线通信等多种功能,通过无线通信方式形成一个多跳的自组织网络系统.无线传感器网络所具有的低成本、动态性强、自组织和容错性强等特点,使其在军事、环境监测、医疗保健和交通管理等领域得到了广泛的应用^[1,2].近年来,对无线传感器网络技术的研究取得了飞速的发展,但是传感器节点具有的计算、存储和通信能力等都十分有限,因此,如何设计更加高效的无线传感器网络成为目前研究的重点^[3-5].

越来越多的网络应用场合高度地表现为依赖于较高的数据传输速率.这就意味着需要更大的网络容量才能满足业务需求,然而在无线网络中,容量是受限的.因而,很多研究人员致力于流控制的设计以实现流速率有效和公平的分配^[6,7].自 Kelly 等人首次应用网络效用最大化架构来设计无线网络的流控制问题^[8],对网络效用最大化问题的研究在过去 10 年得到了广泛的开展^[9,10],同时也涌现出了一系列解决网络效用最大化问题的数学方法^[11,12].基于此,网络效用最大化在很多领域得到了广泛应用^[13-15].Chiang 等人致力于网络跨层设计的研究,并权衡拥塞控制与功率控制来优化网络的总体性能^[13].Xue 等人^[14]对 ad hoc 网络资源分配和拥塞控制问题进行了深入的研究.Wang 等人提出了联合拥塞控制与 MAC 层设计的算法^[15].然而,以上研究考虑的均是链路容量限制,而忽略了无线网络一个重要的特点——能量受限.

文献[5]研究了无线传感器网络在网络生命周期和链路干扰联合约束下的异步流控制算法.给定网络生命周期的要求,考虑节点能量消耗,在网络效用最大化的架构下,Srinivasan 等人对网络速率最优分配问题进行了深入的研究^[16].Zhu 等人权衡无线传感器网络速率分配和网络生命周期,将其表示成一个带有约束的最大化问题,并对问题进行了部分分布式和完全分布式算法的求解^[17].考虑容量和共享介质的干扰,Yuen 等人^[18]提出了一种解决数据传输能耗最小问题的分布式算法.为实现无线网络效用的最大化,Pradeep 等人^[19]结合同伦算法与互补几何规划,提出了一个跨层的网络资源分配机制.Huang 等人设计了一种联合拥塞控制与调度的优化算法以实现多跳无线网络的效用最大化以及端到端时延的最小化^[20].在保证无线传感器网络寿命并满足数据采集时延的要求下,Zhao 等人^[21]提出了一个最优移动数据采集策略.然而,所有这些研究存在着两方面的不足:

- (1) 采用的流控制机制,只适用于弹性通信,即效用函数是严格凹函数的业务^[22];
- (2) 采用了传统的对偶分解和次梯度算法,不可避免地出现了收敛速度慢、步长不易调节、通信负荷大等缺陷,严重制约了算法在实际网络实施中的性能.

近年来,非弹性业务在实际中的应用显得日益重要,例如音频与视频监控、实时交通监测和地震活动监测等等.因此,设计为弹性和非弹性业务有效分配网络资源的流控制机制显然极为迫切;同时,设计具有快速收敛性的分布式求解算法对容量和能量均受限的无线传感网络显得尤为重要.为此,本文研究了无线传感器网络面向混合通信业务的流控制问题,在同时考虑接收容量^[23]和网络生命周期的联合约束下,采用事件触发算法^[24]对流控制问题进行了高效的分布式求解,为弹性和非弹性业务有效分配了网络资源.与对偶分解算法相比,本文所提方法大幅度降低了无线传感器网络节点间的通信量,减少了网络的通信开销,并且对网络规模扩展的适应性更强.

1 问题描述

1.1 基本问题

无线传感器网络通常由微处理器控制的传感器节点、汇聚节点和管理节点组成,各传感器节点通过自组织的方式构成网络,并将监测到的信息进行处理后,以多跳中继的方式传送给汇聚节点.在无线传感器网络中,包括数据传输^[18]、最大化寿命路由^[25]、资源分配^[14]和拥塞控制^[15,26]等很多问题都可以归结为优化问题.当使用分布式算法解决以上问题时,传感器节点之间相互通信以联合解决整个网络的优化问题.

树形结构是无线传感器网络中主导的拓扑结构,在树形结构中,源节点以及传感节点向单一的汇聚节点传送并转发数据.汇聚节点只负责数据的接收,对网络的效用没有任何贡献,在树形结构下,首先确立无线传感器网络效用最大化的构架:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P1}: \max U(\mathbf{x}) &= \sum_{s \in S} U_s(x_s) \\
 \text{s.t. } x_s &\in A
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中, x_s 为流 s 的速率, $U_s(x_s)$ 为流 s 的效用函数, S 为网络所含流集合, A 代表流速率的可行域(容量域与能量域等). 为解决上述优化问题,首先需确定效用函数的具体形式以及流速率的可行域.

1.2 接收容量

在传统的有线网络中,容量是对任意两个节点间存在的链路而言的,穿过某条链路的所有流,通常线性的共用该链路所具有的固定容量.然而在无线网络中,链路容量不是固定的,受该链路邻域内存在的干扰链路的影响.文献[23]研究表明,采用接收容量更加接近实际情况.因此,本文采用由 Sridharan 等人提出的接收容量来表示无线传感器网络采集树的容量域.在某个节点干扰范围内的所有传感器节点均能共享该节点的容量,对任意节点 i : 1) 子节点向其传送的流速率; 2) 干扰节点向其传送的流速率; 3) 节点 i 输出的流速率.三者之和不能超过节点 i 的接收容量.

通过接收容量,我们可以确定采集树上信息流速率分配的约束条件.记 N_i 为节点 i 邻居节点(包括 i 自身)的集合, C_i 为节点 i 子节点(包括 i 自身)的集合, x_i 为源节点 i 发送的数据速率, B_i 为节点 i 的接收容量.那么,节点 i 的接收容量约束可以表示为

$$\sum_{j \in N_i} \sum_{k \in C_j} x_k \leq B_i
 \tag{2}$$

我们通过一个例子来对其进行解释.图 1 表示一个含有 6 个节点的采集树,实线表示树中的父子关系,虚线表示两邻居节点间存在的干扰链路.干扰链路上的流速率是对邻居节点向其父节点传送数据时所产生干扰的量化.例如,当节点 2 以某种速率向汇聚节点 0 传送数据时,节点 2 不仅消耗汇聚节点 0 相应的接收容量,还消耗节点 1 相应的接收容量,在链路 2→0 和 2→1 上用相同的速率予以表示.

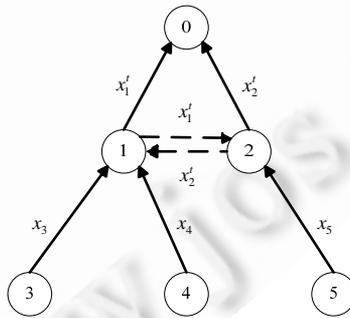


Fig.1 An example of the receiver capacity

图 1 接收容量模型的诠释

依据接收容量的模型,我们可以得到节点 2 上流速率的约束条件为

$$x'_1 + x'_2 + x_5 \leq B_2
 \tag{3}$$

其中, B_2 为节点 2 的接收容量, x_5 为节点 5 产生的流速率, x'_1 与 x'_2 分别为节点 1 和节点 2 总的输出流速率(自身所产生的流速率与中继传感节点的流速率之和), 并且 $x'_1 = x_1 + x_3 + x_4$, $x'_2 = x_2 + x_5$, 无线电广播设备的半双工性质致使流速率 x_5 在不等式(2)中出现了两次.类似地,利用不等式(2)可以求出图 1 所示的拓扑结构中其他节点接收容量的约束条件.

假设汇聚节点 0 具有充足的接收容量,依据不等式(2)可以确定采集树上其他各节点接收容量的约束为

$$\left. \begin{aligned} x_1 + x_2 + 2x_3 + 2x_4 + x_5 &\leq B_1 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + 2x_5 &\leq B_2 \\ x_1 + 2x_3 + x_4 &\leq B_3 \\ x_1 + x_3 + 2x_4 &\leq B_4 \\ x_2 + 2x_5 &\leq B_5 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

不等式集合(4)可用矩阵形式表示为

$$A'x \leq c_1 \quad (5)$$

其中, $x=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T, c_1=[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]^T, A' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$.

1.3 能量模型与传感器节点寿命

用 e_n 表示节点 n 的初始能量,其中, $n \in \mathcal{N}=[1, \dots, 5], N=|\mathcal{N}|$ (\mathcal{N} 为所有传感器节点的集合,本文假设汇聚节点具有足够的能量,因此在本文中, \mathcal{N} 表示除汇聚节点 0 以外的所有传感器节点的集合). e^s 表示节点在空闲状态单位时间内的能耗, e^r 与 e^t 分别表示节点在单位时间内接收和传送单位数据的能耗, $S(n)$ 表示使用传感器节点 n 作为中继传感器节点的流集合,对于预先设定的寿命 T_n^{goal} , 节点 n 的能量约束条件为

$$(e^t + e^r) \sum_{s \in S(n)} x_s + e^t \varepsilon_n + e^s \leq c_n^{goal} \quad (6)$$

其中, $c_n^{goal} = e_n / T_n^{goal}$ 为节点 n 可用的平均功耗.如果流 s' 由节点 n 发出,则 $\varepsilon_n = x_{s'}$; 否则, $\varepsilon_n = 0$.假设汇聚节点具有足够的能量,则不等式(6)可用矩阵形式表示为

$$Ax \leq c_2 \quad (7)$$

其中, $c_2 = (c_1^{goal} - e^s, c_2^{goal} - e^s, \dots, c_N^{goal} - e^s)^T, A$ 为 $N \times N$ 阶矩阵,第 n 行 s 列元素 a_{ns} 为

$$a_{ns} = \begin{cases} e^t + e^r, & s \in S(n) \\ e^t, & \text{flow } s \text{ starts from sensor node } n. \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

结合不等式(5)和不等式(7),可以得出无线传感器网络在接收容量和网络寿命约束下流速率的可行域 A 为

$$Rx \leq c \quad (8)$$

其中, R 为 $M \times N$ 阶矩阵, $M=2N, R=(A'^T, A^T)^T, c = (c_1^T, c_2^T)^T, R$ 可称之为增广路由矩阵.

1.4 效用公平

随着无线传感器网络技术的迅速发展,未来的无线传感器网络将有望应用于实时(非弹性)通信业务,并能够高质量、实时传输多媒体信息,比如音频和视频监控等.这些业务通常对时延比较敏感并具有严格的服务质量要求(QoS),另外,与传统的数据传输不同,在实时通信中,带宽的不足可能会严重影响网络的 QoS 性能.

现有的流控制协议主要是针对性的管理具有弹性带宽约束的通信方式,只要分配一个非零的带宽,这类通信方式就会获得一个非零的效用.通常可以通过定义一个效用函数来测量弹性通信的增益,效用函数往往是关于流速率的严格凹函数,通常用流速率的对数函数来表示,比如 $U_s(x_s) = \partial_s \log(x_s + 1)$,其中, x_s 表示流 s 的速率, U_s 表示流 s 速率为 x_s 时所产生的效用, $\partial_s \geq 0$ 为加权系数.

在通信网络中,速率控制(也称流控制)是资源公平和有效分配的一项重要技术.继开创性的提出最优流控制^[8]以来,对网络流控制问题的研究得到了广泛的开展.

从文献[27]中可以看出,虽然最优流控制在处理拥塞控制和资源分配方面取得了巨大的进展,但是,以追求

效用最大化为目标使得最优流控制在某些方面也存在着严重的局限性:

- 1) 最优流控制研究的是弹性通信业务(效用函数用严格的凹函数来模拟),它不适用于非弹性通信业务(效用函数用非凹函数来模拟),如日益盛行的实时通信;
- 2) 效用最大化和效用公平之间存在严重的冲突.对于具有不同服务质量要求的信息流,最优流控制旨在追求网络效用的最大化,这可能会导致具有竞争的信息流之间效用的极端不公平.尤其是对于具有严格带宽约束的信息流,可能会分配一个低于其最低需求的带宽,以致非弹性信息流的效用为 0.

为了支持异构通信(弹性和非弹性通信),使得无线传感器网络能够处理弹性与非弹性通信相混合的通信业务,并且保证具有竞争的流之间的效用公平,本文采用由 Wang 等人^[27]提出的一种新的流控制机制——效用公平流控制.这种新的流控制机制不仅适用于弹性通信,而且也有能力处理非弹性通信.实时非弹性通信的效用函数通常采用 sigmoid 函数来表示,函数表达式如下:

$$U_s(x_s) = \begin{cases} 0, & \text{if } x_s \leq B^{\min} \\ \frac{1}{1 + e^{-a(x_s - b)}}, & \text{if } B^{\min} \leq x_s \leq B^{\max} \\ 1, & \text{if } x_s \geq B^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中, B^{\min} 和 B^{\max} 分别为非弹性信息流要求的最小带宽和最大带宽, $b = \frac{B^{\max} + B^{\min}}{2}$; a 为控制 sigmoid 函数坡度的常数.

在效用公平流控制策略下,对于每个效用为 U_s 的流 s ,我们重新定义一个伪效用函数:

$$U'_s(x_s) = \int_{m_s}^{x_s} \frac{1}{U_s(\eta)} d\eta, m_s \leq x_s \leq M_s \quad (10)$$

其中, $m_s \geq 0$ 和 $M_s < \infty$ 分别为流 s 允许的最小传输速率与最大传输速率.将基本问题 **P1** 中效用函数用伪效用函数 U'_s 代替,可以得到优化问题 **P2**:

$$\mathbf{P2}: \max U(x) = \sum_{s \in S} U'_s(x_s) \left. \begin{matrix} \\ \text{s.t. } x_s \in A \end{matrix} \right\} \quad (11)$$

依照 **P2** 的优化条件,在最优均衡点 \mathbf{x}^* ,对于任意的可行速率 $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*$:

$$\sum_{s \in S} \frac{\partial U'_s(x_s^*)}{\partial x_s} (x_s - x_s^*) = \sum_{s \in S} \frac{x_s - x_s^*}{U'_s(x_s^*)} \leq 0 \quad (12)$$

根据比例公平的定义,对于任意的 $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*$,如果

$$\sum_{s \in S} \frac{x_s - x_s^*}{x_s^*} \leq 0 \quad (13)$$

那么,速率分配 \mathbf{x}^* 是比例公平的.因此,问题 **P2** 在效用方面实现了比例公平.

需要指出的是,问题 **P2** 与 **P1** 在机理上是不同的,**P1** 试图在速率方面实现比例公平,而 **P2** 实现的是效用比例公平.

1.5 问题模型

借助于伪效用的概念,采用树形结构作为无线传感器网络的拓扑结构,在接收容量与网络寿命的联合约束下,根据上述推导过程,我们可以建立如下的无线传感器网络面向混合通信业务的流控制问题:

$$\mathbf{P}: \max U(x) = \sum_{s \in S} U'_s(x_s) \left. \begin{matrix} \\ \text{s.t. } \mathbf{R}\mathbf{x} \leq \mathbf{c} \end{matrix} \right\} \quad (14)$$

从等式(10)可以看出:

$$U'_s(x_s) = \frac{1}{U_s(x_s)}, m_s \leq x_s \leq M_s \quad (15)$$

结合 $U_s(x_s)$ 严格递增的性质,可以得出 $U'_s(x_s) > 0$, 且 $U'_s(x_s)$ 是严格递减的.因此,不论流 s 的效用函数 $U_s(x_s)$ 具有什么样的凹凸性,伪效用 $U_s(x_s)$ 在区间 $[m_s, M_s]$ 上是一个严格递增的凹函数.

对于本文所研究的流控制问题,传感节点既能自身产生一定的流速率,又能中继其他节点的流传输,这就意味着,每个节点既可以充当用户的功能,又可以充当链路的功能.为后面算法的叙述方便,可将增广路由矩阵 \mathbf{R} 对应的行称为虚拟链路节点,对应的列称为用户节点.

2 对偶分解算法

引入拉格朗日乘子,我们将问题分解为若干个子问题,使得每个节点/链路上的子问题能够独立、并行地解决.首先,我们可以得到问题(14)的拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \sum_{i=1}^N U_i(x_i) - \mathbf{p}^T (\mathbf{R}\mathbf{x} - \mathbf{c}) \quad (16)$$

其中 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T$ 是与不等式 $\mathbf{R}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}$ 相关的拉格朗日乘子矢量.由此可得,原问题的对偶问题为

$$D: \min_{\mathbf{p} \geq 0} \max_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (17)$$

假设 $[\mathbf{x}^*, \mathbf{p}^*]$ 为对偶问题的最优解,那么 \mathbf{x}^* 即为原问题的最优解.

对任意的节点 i , 求解对偶问题,可得如下结果:

$$\begin{aligned} x_i^{k+1} &= \arg \max_{m_i \leq x_i \leq M_i} \left\{ U_i(x_i) - \sum_{j=1}^M p_j^k r_{ji} x_i \right\} \\ p_j^{k+1} &= \max \left\{ 0, p_j^k + \gamma \left(\sum_{i=1}^N r_{ji} x_i^k - c_j \right) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

在等式(18)中,选择步长 γ 时,要确保序列 $\{x_i^k\}_{k=0}^\infty$ 和 $\{p_j^k\}_{k=0}^\infty$ 渐近收敛于对偶问题的最优解.Low 等人^[6]已经证实,合适的步长需要满足:

$$0 < \gamma \leq \gamma^* = \frac{-2 \max_{(i, x_i)} \nabla^2 U_i(x_i)}{LS} \quad (19)$$

其中,对任意节点而言, \bar{L} 表示它所使用中继虚拟链路节点的最大数目, \bar{S} 表示使用其作为中继虚拟链路节点的最大节点数目.从公式(19)中可以看出,步长 γ 与 \bar{L} 和 \bar{S} 成反比.也就是说,对偶分解算法的计算复杂度正比于 \bar{L} 和 \bar{S} . 使用对偶分解算法,在每次迭代过程中,子系统之间都需进行一次信息交互,因此,步长 γ 还决定了网络的通信复杂度.如果选择固定的步长,那么使用对偶分解算法时,网络的通信复杂度也将正比于 \bar{L} 和 \bar{S} .

然而,对偶分解和次梯度算法存在着收敛速度慢、步长不易调节等缺陷,加重了无线传感器网络流控制协议实施的通信负担,因而极大限制了在容量和能量均受限的无线传感器网络中的应用.为此,本文提出了基于事件触发的分布式算法,在事件触发下,当局部误差信号超过依赖于状态的阈值时,传感节点之间才进行一次信息的传递,节点间的信息交互并非发生在每一次的迭代运算之中,它有效减少了网络的通信负荷,从而降低了流控制协议实施所需的带宽和能量开销.

3 事件触发算法

本文所采用的事件触发算法^[21],是在增广拉格朗日方法的基础上引入事件触发思想而形成的一种新的分布式算法.其核心是节点之间的信息交互是由局部误差信号超过一个依赖于状态的阈值时所触发.

3.1 增广拉格朗日

记虚拟链路节点集为 $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$, 引进松弛变量 $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^M$, 将不等式约束 $\mathbf{c}_j - \mathbf{R}_j^T \mathbf{x} \geq 0, \forall j \in \mathcal{M}$ 转化为等价的等式约束:

$$\mathbf{R}_j^T \mathbf{x} - \mathbf{c}_j + \mathbf{s}_j = 0, \mathbf{s}_j \geq 0, \forall j \in \mathcal{M} \quad (20)$$

进而可得增广拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega}) = -\sum_{i=1}^N \mathcal{U}_i(x_i) + \sum_{j=1}^M \lambda_j (\mathbf{R}_j^T \mathbf{x} - c_j + s_j) + \sum_{j=1}^M \frac{1}{2\omega_j} (\mathbf{R}_j^T \mathbf{x} - c_j + s_j)^2 \quad (21)$$

其中, ω_j 是与每个约束相对应的惩罚参数, $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$ 表示惩罚参数矢量.

假设 λ_j^* 是流控制问题在 KKT 条件下与 $c_j - \mathbf{R}_j^T \mathbf{x} \geq 0$ 相对应的朗格朗日乘子, λ_j 是对 λ_j^* 的一个估计, 并且 $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]^T$, 矢量 $\mathbf{R}_j^T = [R_{j1}, R_{j2}, \dots, R_{jN}]$ 表示增广路由矩阵 \mathbf{R} 的第 j 行.

对于序列 $\{\boldsymbol{\lambda}^k\}_{k=0}^\infty$ 和 $\{\boldsymbol{\omega}^k\}_{k=0}^\infty$, 增广拉格朗日方法通过最小化 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}^k, \boldsymbol{\omega}^k)$ 来求解流控制问题. 记 \mathbf{x}^{*k} 为 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}^k, \boldsymbol{\omega}^k)$ 的近似最优解, 文献[28]第 4.2 节中的方法表明: 选取合适的序列 $\{\boldsymbol{\lambda}^k\}_{k=0}^\infty$ 和 $\{\boldsymbol{\omega}^k\}_{k=0}^\infty$, 则近似最优解 $\{\mathbf{x}^{*k}\}_{k=0}^\infty$ 渐近收敛于流控制问题的最优解. 序列选择如下:

- 序列 $\{\lambda_j^k\}_{k=0}^\infty$ 是对拉格朗日乘子的估计, 其中, $\lambda_j^{k+1} = \max \left\{ 0, \lambda_j^k + \frac{1}{\omega_j^k} (r_j^T \mathbf{x}^{*k} - c_j) \right\}$;
- 惩罚参数序列 $\{\omega_j^k\}_{k=0}^\infty$ 单调递增至 0.

由于在无线传感器网络中, 传感节点具有有限的电池寿命, 通常求取问题的近似最优解即能满足网络业务的需要. 因此在本文中, 我们只考虑通过选取恒定的 $\boldsymbol{\lambda}$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 来最小化 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega})$. 令 $\lambda_j = 0$ 并且 ω_j 足够的小, 最小化 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega})$ 能够很好地近似于原流控制问题. 基于以上分析, 可以得出增广拉格朗日算法的步骤如下:

- 1) 初始化: 选择一组合适的流速率初值 $\mathbf{x}^0 > 0$, 松弛变量 $\mathbf{s}^0 > 0$, 取 $\lambda_j = 0$ 与充分小的 $\omega_j > 0, j = 1, \dots, M$;
- 2) 循环迭代: 最小化 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega})$:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \min \{ m_s, \mathbf{x}^k - \gamma \nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}^k, \mathbf{s}^k; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega}) \}, M_s \quad (22)$$

$$\mathbf{s}^{k+1} = \max \{ 0, \mathbf{s}^k - \gamma \nabla_{\mathbf{s}} L(\mathbf{x}^k, \mathbf{s}^k; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega}) \} \quad (23)$$

$\boldsymbol{\omega}$ 越小, 所得的近似解就越精确. 步骤 2) 中的循环迭代运算使用梯度下降法来求解 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega})$ 的最小化问题, 其中, γ 是充分小的步长.

在对偶分解算法和增广拉格朗日算法中, 传感节点间的信息交互发生在每一次迭代运算之中, 这就意味着, 传感节点间信息交互的次数与算法收敛所需迭代运算的次数相等. 迭代运算的次数又取决于算法中所取步长的大小, 在上述两种算法中, 所取的步长通常比较小, 也就是说, 使用上述两种算法, 网络的通信量会非常大.

事件触发机制会极大地降低网络的通信复杂度, 为减少无线传感器网络节点间的信息交互量, 降低网络的通信开销, 接下来的一节, 我们将引入事件触发的思想, 以实现对上述流控制问题进行事件触发式的求解.

3.2 事件触发算法

本节主要介绍如何对第 3.1 节中的算法进行事件触发式的实施. 对于分布式事件触发算法, 其核心是传感节点之间的信息交互是由局部误差信号超过一个依赖于状态的阈值时所触发, 在事件触发下, 当局部误差信号超过依赖于状态的阈值时, 传感节点之间才进行一次信息的传递. 算法的关键是阈值条件的确定, 以保证算法渐近收敛于问题的最优解.

记节点 i 中继使用的虚拟链路节点集为 \mathcal{L}_i , 使用节点 i 作为中继虚拟链路节点的节点集为 \mathcal{S}_i . 对于任意的虚拟链路节点 $j \in \mathcal{M}$, 使用梯度下降法, 可以求出:

$$s_j(t) = -\int_0^t (\nabla_{s_j} L(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{s}(\tau); \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega}))_{s_j(\tau)}^+ d\tau = \int_0^t (-\mu_j(\tau))_{s_j(\tau)}^+ d\tau \quad (24)$$

其中,

$$\mu_j(t) = \lambda_j + \frac{1}{\omega_j} \left(\sum_{i \in \mathcal{S}_j} R_{ji} x_i - c_j + s_j \right) \quad (25)$$

正投影函数 f 定义为

$$(f(x))_x^+ = \begin{cases} 0, & \text{if } x = 0 \text{ and } f(x) < 0 \\ f(x), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

等式(24)中, 使用正投影函数以确保辅助变量 $s_j(t)$ 总是非负的.

等式(24)和等式(25)其实是伴随虚拟链路节点 $j \in \mathcal{M}$ 的动态系统方程,流过虚拟链路节点 j 的所有流速率为该一阶动态系统的输入, μ_j 为系统的输出.在这里,我们称 μ_j 为虚拟链路节点 j 的链路状态.

上面的等式以连续时间的形式使用虚拟链路节点 j 的链路状态,下面我们考虑等式(24)的事件触发形式.假设以采样的形式使用虚拟链路节点 j 的链路状态,对虚拟链路节点 j 赋一采样时间序列 $\{T_j^l[\ell]\}_{\ell=0}^{\infty}$, $T_j^l[\ell]$ 代表虚拟链路节点 j 第 ℓ 次采样它的链路状态并将所得链路状态传送给使用它的用户节点 $i \in \mathcal{S}_j$ 时所对应的时刻.由此可见,对于任意的 $\ell=0, \dots, \infty$, 当 $t \in [T_j^l[\ell], T_j^l[\ell+1])$ 时,采样链路状态:

$$\hat{\mu}_j(t) = \mu_j(T_j^l[\ell]) \tag{27}$$

由此可见, $\hat{\mu}_j(t)$ 是时间 t 的分段常函数.

记用户节点集为 $\mathcal{S}=\{1, \dots, N\}$, 假定在每次 $\hat{\mu}_j(t)$ 的广播传送中没有时间延迟,对任意的用户节点 $i \in \mathcal{S}$ 和 ℓ , 当时间 $t \in [T_j^l[\ell], T_j^l[\ell+1])$ 时,有:

$$x_i(t) = \int_0^t \left(\frac{\partial \mathcal{U}_i(x_i(\tau))}{\partial x_i} - \sum_{j \in \mathcal{L}_i} R_{ji} \hat{\mu}_j(\tau) \right)_{x_i(\tau)}^+ d\tau \tag{28}$$

下面来确定采样时刻 $\{T_j^l[\ell]\}$ 以确保等式(22)和等式(23)的收敛.为叙述方便,我们将用户节点 i 的流速率 $x_i(t)$ 的梯度记为 $Z_i(t)$, 并称 Z_i 为节点 i 的用户状态.显而易见,对所有的 $i \in \mathcal{S}$, $Z_i(t)$ 满足等式:

$$Z_i(t) = \nabla_i(x_i(t)) = \left(\frac{\partial \mathcal{U}_i(x_i(t))}{\partial x_i} - \sum_{j \in \mathcal{L}_i} R_{ji} \hat{\mu}_j(t) \right)_{x_i(t)}^+ \tag{29}$$

此时,拉格朗日函数 $L(x, s; \lambda, \omega)$ 的负梯度 $-\nabla L(x, s; \lambda, \omega)$ 为

$$\begin{aligned} -\nabla_i L(x, s; \lambda, \omega) &= -\sum_{i=1}^N \frac{\partial L}{\partial x_i} \cdot \frac{dx_i}{dt} - \sum_{j=1}^M \frac{\partial L}{\partial s_j} \cdot \frac{ds_j}{dt} \\ &= \sum_{i=1}^N Z_i \left[\frac{\partial \mathcal{U}_i(x_i(t))}{\partial x_i} - \sum_{j=1}^M R_{ji} \mu_j \right] + \sum_{j=1}^M (-\mu_j)_{s_j}^+ (-\mu_j) \\ &\geq \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{2} Z_i^2 - \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1}^M (\mu_j - \hat{\mu}_j) R_{ji} \right]^2 \right\} + \sum_{j=1}^M [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 \\ &\geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N Z_i^2 - \frac{\bar{L}}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\mu_j - \hat{\mu}_j)^2 R_{ji}^2 + \sum_{j=1}^M [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N Z_i^2 + \sum_{j=1}^M \left\{ \rho_j [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 - \frac{\bar{L}}{2} (\mu_j - \hat{\mu}_j)^2 \sum_{i=1}^N R_{ji}^2 \right\} + \sum_{j=1}^M (1 - \rho_j) [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 \end{aligned} \tag{30}$$

其中,对于所有的虚拟链路节点 $j \in \mathcal{M}$, 设常数 ρ_j 满足 $0 < \rho_j \leq 1$, 则有:

$$\nabla_i L(x, s; \lambda, \omega) \leq -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N Z_i^2 - \sum_{j=1}^M \left\{ \rho_j [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 - \frac{\bar{L}}{2} (\mu_j - \hat{\mu}_j)^2 \sum_{i=1}^N R_{ji}^2 \right\} - \sum_{j=1}^M (1 - \rho_j) [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 \tag{31}$$

函数 $L(x, s; \lambda, \omega)$ 其实就是该系统的李雅普诺夫函数,根据李雅普诺夫稳定性理论,要想使得该系统收敛于流控制问题的最优解,需满足 $\nabla_i L(x, s; \lambda, \omega) \leq 0$.

由不等式(31)可知,对于所有的 $j \in \mathcal{M}$ 和 $\ell=0, \dots, \infty$, 在时间段 $t \in [T_j^l[\ell], T_j^l[\ell+1])$ 上,当

$$\rho_j [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 - \frac{\bar{L}}{2} (\mu_j - \hat{\mu}_j)^2 \sum_{i=1}^N R_{ji}^2 \geq 0 \tag{32}$$

时,不等式 $\nabla_i L(x, s; \lambda, \omega) \leq 0$ 恒成立.

不等式(32)从本质上说明,需要确定链路状态传送时刻 $T_j^l[\ell]$ 以确保不等式(32)总是成立.虚拟链路节点 j 不停地比较当前时刻链路状态 μ_j 与前一时刻传输链路状态 $\hat{\mu}_j$ 差值的平方.在采样时刻 $T_j^l[\ell]$, 状态差值的平方等

于 0;之后, μ_j 不断地变化,并可能会违背不等式(32).令这一时刻为下次采样时刻 $T_j^l[\ell+1]$,并将新采样得到的链路状态 $\hat{\mu}_j$ 传送给使用它的用户节点 $i \in \mathcal{S}_j$.

不等式(32)确定的阈值条件,为第 3.1 节所提算法进行事件触发式的实施提供了基础,下面将提出分布式事件触发算法的具体实施步骤.

在网络中,当运用不等式(32)触发虚拟链路节点采样并向使用它的用户节点传送链路状态时,函数 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega})$ 其实就是该系统的李雅普诺夫函数,因此,不等式(32)也就确保了系统能够收敛于流控制问题的最优解.

对于所有的用户节点 $i \in \mathcal{S}$,见算法 1.

算法 1. 用户节点 i 的流速率更新算法.

- 1) 参数初始化:选择合适的流速率初值 $m_s \leq x_i^0 \leq M_s$,并令初始采样时刻 $T=0$;
- 2) 状态初始化:一旦从 $j \in \mathcal{L}_i$ 接收到初始虚拟链路状态,就令 $\hat{\mu}_j = \mu_j(T)$;
- 3) 流速率更新:

$$x_i(t) = \min \left\{ \max \left\{ \int_T^t \left(\frac{\partial \mathcal{U}_i(x_i(\tau))}{\partial x_i} - \sum_{j \in \mathcal{L}_i} R_{ji} \hat{\mu}_j(\tau) \right)_{x_i(\tau)}^+ d\tau, m_s \right\}, M_s \right\}, x_i(T) = x_i^0.$$

其中, $t \in [T, T^+)$, T^+ 为下述条件成立时对应的时刻:

当用户节点 i 从它所使用的虚拟链路节点 $j \in \mathcal{L}_i$ 上接收到一个新的链路状态 $\mu_j^+(T^+)$ (对于一个定义在区间 $t \in [0, T)$ 上的函数 $f(t)$, $f^+(T)$ 表示 $f(t)$ 在 T 处的左极限)时,令 $\hat{\mu}_j = \mu_j^+(T^+)$.

- 4) 时间更新:令 $T=T^+$, $x_i^0 = x_i^-(T^+)$,返回步骤 3).

虚拟链路节点 $j \in \mathcal{L}$ 上的算法与用户节点上的算法类似.假设在任意时刻 t ,虚拟链路节点 j 可以连续的测量它的链路状态 $\mu_j(t)$,可得虚拟链路节点上的算法如下:

算法 2. 虚拟链路节点 j 的更新算法.

- 1) 参数初始化:选择合适的初始松弛变量 $s_j^0 \geq 0$, $\omega_j > 0$, $0 < \rho_j \leq 1$,并令初始采样时刻 $T=0$;
- 2) 状态初始化:根据公式(25)测量局部链路状态 $\mu_j(T)$,并将 $\mu_j(T)$ 传送给所有使用它的用户节点 $i \in \mathcal{S}_j$,并令 $\hat{\mu}_j = \mu_j(T)$;
- 3) 虚拟链路更新:

$$s_j(t) = \int_T^t (-\mu_j(\tau))_{s_j(\tau)}^+ d\tau, \mu_j(t) = \frac{1}{\omega_j} \left(\sum_{i \in \mathcal{S}_j} R_{ji} x_i(t) - c_j + s_j(t) \right), s_j(T) = s_j^0,$$

其中, $t \in [T, T^+)$, T^+ 为下述条件成立时对应的时刻:

如果 $\rho_j [(-\mu_j)_{s_j}^+]^2 \leq \frac{\bar{L}}{2} (\mu_j - \hat{\mu}_j)^2 \sum_{i=1}^N R_{ji}^2$, 则令 $\hat{\mu}_j = \mu_j^+(T^+)$,并将更新的虚拟链路状态 $\mu_j^+(T^+)$ 发送给所有使用它的用户 $i \in \mathcal{S}_j$.

- 4) 时间更新:令 $T=T^+$, $s_j^0 = s_j^+(T^+)$,返回步骤 3).

依据阈值条件式(32)以及上述分析,由算法 1 和算法 2 求出的 $\mathbf{x}(t)$ 和 $\mathbf{s}(t)$ 渐近收敛于 $L(\mathbf{x}, \mathbf{s}; \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\omega})$ 的最小值点,因而也就收敛于流控制问题的近似最优解.

4 仿真实验

本文无线传感器网络采用了树形拓扑结构,采集树的根节点为网络的汇聚节点,在节点接收容量和能量的联合约束下,所有叶节点和中间节点向根节点传递信息数据.针对面向混合业务的流传输问题,比较了事件触发算法和对偶分解算法的信息交互量.仿真结果显示,与对偶分解算法相比,本文所采用的事件触发算法能够将网络的信息交互量降低近两个数量级;并且,事件触发算法对网络规模扩展的适应性更强.此外,对于弹性流与非弹性流混合传输的情况,本文还仿真比较了采用速率公平和效用公平两种不同流控制机制下的网络性能.

4.1 仿真场景

采用图 1 所示的树形结构作为本文无线传感器网络的基本拓扑结构.网络结构确定后,为每个传感器节点分配一个相应的效用函数 $U_s(x_s) = \int_{m_s}^{x_s} \frac{1}{U_s(\eta)} d\eta, m_s \leq x_s \leq M_s$,其中, $U_s(x_s) = \partial_s \log(x_s + 1)$, m_s 和 M_s 分别为流 s 的最小传输速率与最大传输速率.仿真时,设加权系数 ∂_s 在区间[0.1,1]上随机分布,流 s 允许的最小传输速率与最大传输速率 m_s 和 M_s 分别设为 0.2 和 1.传感节点 1~传感节点 5 的接收容量设置为[2.5,2,1.5,1.5,1],初始能量设置为 [2500,2000,1000,1000,1000].取能耗参数 $e^r=1, e^t=1.4, e^s=0.83^{[29]}$;每个传感节点的寿命设为 800.

设用全局优化方法求解所得的最优流速率和效用分别为 x^* 和 U^* ,对两种算法,记误差为

$$e(k) = \left| \frac{U(x(k)) - U^*}{U^*} \right| \tag{33}$$

其中, $x(k)$ 为第 k 次迭代所获得的流速率, $e(k)$ 表示第 k 次迭代的归一化误差.当 $e(k) \leq e_{end}$ 时,迭代终止, e_{end} 为预设的一个归一化误差极限.在对偶分解算法中,信息交互与迭代运算是同步的,因此迭代步数也代表网络总的信息交互量.在事件触发算法中,触发事件的发生是异步的,我们将所有的触发事件相加并除以总的虚拟链路数 M , 所得结果为事件触发算法的等价迭代步数和总的信息交互量^[21].

仿真时,取 $e_{end}=0.005$.对于所有的流,在两种算法下,初始流速率均设为在区间[0.2,1]上随机分布的变量;在对偶分解算法中,对于所有的 $j \in M$, 设 $p_j=1$,步长 γ 由不等式(19)确定;在事件触发算法中,对于所有的 $j \in M$, 设 $\lambda_j=0, \rho_j=0.9, \omega_j=0.01$.

4.2 混合业务场景下的效用比较

本文采用效用公平流控制机制的目的在于使得无线传感器网络能够处理弹性流与非弹性流相混合的通信方式,本节仿真验证了这一点.

我们在图 1 所示的网络拓扑结构下,以节点所获得的流速率和效用为标准比较了效用公平和速率公平两种流控制机制在混合通信方式下的性能,如图 2 所示,其中,由节点 2、节点 4、节点 5 产生的流为非弹性的,节点 1 和节点 3 产生的流为弹性的.如前面第 1.4 节所述,弹性流的效用函数用流速率的对数函数来表示,非弹性流的效用函数用 sigmoid 函数来表示,仿真时设 $B^{min}=0.25, B^{max}=0.65, a=3$.结合图 2 在效用公平和速率公平两种机制下流速率和效用的对比可以看出:在速率公平下,当节点 4 和节点 5 发出的非弹性流的速率小于 B^{min} 时,它所获得的效用为 0.这意味着,当非弹性流以小于 B^{min} 的速率向汇聚节点传输数据时,只是在浪费无线传感网络节点的能量.因为速率小于 B^{min} 时,非弹性流获得的效用为 0,在此速率下,汇聚节点收到的信息是无用的.使用效用公平流控制机制时,非弹性流的性能得到了明显的改善.由图 2 可以看出,在效用公平流控制机制下,节点 4 和节点 5 发出的非弹性流分别获得了一个客观的效用.由此可见,该部分的仿真结果验证了第 1.4 节的理论分析,并体现了效用公平流控制机制能够处理混合通信方式的能力.

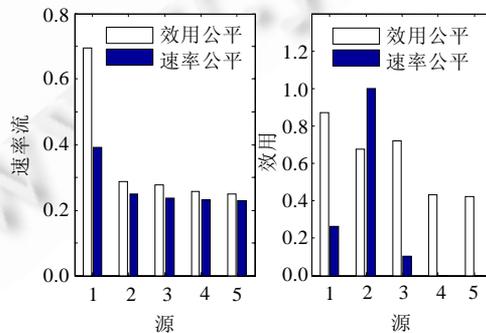


Fig.2 Flow rate and utility comparison for the utility-fair and rate-fair flow control

图 2 效用公平和速率公平流控制下,流速率和效用的比较

4.3 算法的广播周期

本节介绍了本文所用对偶分解和事件触发算法的广播周期结果,并将两种算法下的广播周期进行了比较与讨论.仿真使用同仿真场景部分相同的参数设置,程序运行了 7.93s,对偶分解算法的平均广播周期为 0.0088s;对于事件触发算法,共有 659 次触发事件,平均广播周期为 0.1203s.由此可见,事件触发算法的平均广播周期比对偶分解算法的平均广播周期要大 13 倍.

为了更直观地了解传感节点广播周期的变化情况,在网络中选取了一个由于拥塞或能耗较快等原因导致的广播最为频繁的节点来分析讨论它的广播周期,如图 3 所示.其中,左图横坐标表示节点广播出现的时刻,纵坐标表示对应的广播周期长度;右图是节点广播周期的分布直方图.

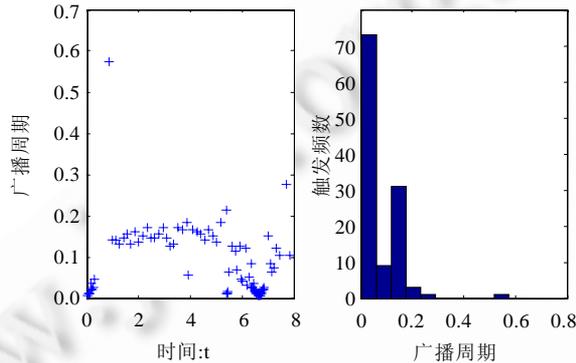


Fig.3 Broadcast period for a frequently broadcasting node

图3 频繁广播节点的广播周期

对于该节点,广播周期变化范围为:0.0052s~0.5747s,触发事件共发生了 118 次,平均广播周期为 0.0663s.虽然该节点最小的广播周期小于对偶分解算法的平均广播周期,但是该节点的平均广播周期比对偶分解算法的平均广播周期要大 7 倍.这是因为:对偶分解算法下,节点间的信息交互发生在每一次迭代运算中,而分布式事件触发算法节点之间的信息交互是由局部误差信号超过依赖于状态的阈值时所触发,在事件触发下,当局部误差信号超过依赖于状态的阈值时,传感节点才向它的邻居节点广播一次,进行一次信息交互,并非每一次迭代运算都伴随着节点间的信息交互.

由此可知:与对偶分解算法相比,事件触发算法的通信策略更加具有实用性,使用事件触发算法,将会降低无线传感器网络节点间的通信量、减少网络的通信开销.

4.4 算法的拓展性能

本节以图 1 所示的网络拓扑结构为基础,在树形结构分支数和深度增加的情况下,仿真验证了本文所采用分布式事件触发算法的性能.其中,网络规模扩展的方式为:以图 1 所示的网络拓扑结构为基础,将节点 5 用图 1 所示的网络拓扑结构代替,以此类推,共扩展了两次.每次扩展中,采集树的分支数和深度分别增加 2,网络总的节点数增加 5.在每个拓扑结构下,对偶分解算法和事件触发算法分别运行 60 次,并在每次网络规模扩展中计算两种算法迭代步数的平均数 K .图 4 反映了随着网络规模的扩展,两种算法所需平均迭代步数 K 的变化情况,3 种拓扑结构下,网络的节点数分别为 6,11 和 16.为了更直观地展现仿真结果,仿真时采用了半对数刻度绘图.由图 4 可知:在每个拓扑结构下,对偶分解算法的平均迭代步数均远大于事件触发算法的平均迭代步数;并且随着网络规模的扩展,对偶分解算法的平均迭代步数 K 由 608 增加到了 1.1181×10^4 ,事件触发算法的平均迭代步数 K 由 66 增加到了 218.

由此可见,事件触发算法的收敛速度要比对偶分解算法快很多;并且随着网络规模的扩展,对偶分解算法收敛所需平均迭代步数的上升幅度要比事件触发算法的大很多.在网络规模较大时,事件触发算法收敛所需的平

均迭代步数比对偶分解算法的要小将近两个数量级,也就意味着,使用事件触发算法比使用对偶分解算法时,网络节点间的通信量要降低近两个数量级,大幅度减少了无线传感器网络的通信开销。

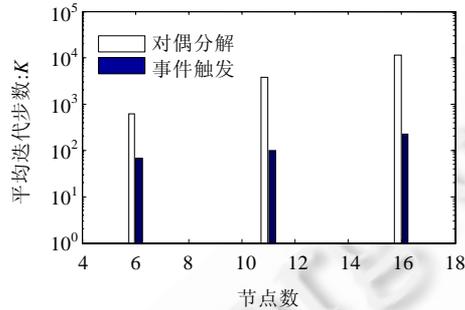


Fig.4 Mean iteration number K as a function of the number of nodes for both algorithms

图 4 两种算法平均迭代次数 K 随网络节点数目的变化情况

5 结 论

无线传感器网络中,节点所具有的能量和通信能力等都十分有限,如何设计有效的协议及算法,利用有限的资源高效地完成诸多任务成为无线传感器网络设计所面临的一大挑战.本文研究了无线传感器网络面向混合业务时的流控制问题,引入了无线传感器网络接收容量的模型,提出了无线传感器网络在节点接收容量和能量受限下的效用公平流控制问题.针对传统对偶分解算法存在着收敛速度慢、步长不易调节、通信负荷大等缺陷,本文提出了基于事件触发的分布式求解算法.理论分析与仿真验证均表明:事件触发算法的通信策略更加具有实用性,使用事件触发算法时,传感节点的平均广播周期要比使用对偶分解算法时大很多,大幅度降低了无线传感器网络节点间的通信量、减少了网络的通信开销.仿真验证也表明:与对偶分解算法相比,分布式事件触发算法具有收敛速度快、对网络规模扩展的适应性强等优势.此外,仿真验证表明:与传统的速率公平流控制机制相比,本文所提的效用公平流控制模型能够更加适应弹性与非弹性业务共存的网络场景.

为了进一步实现对无线传感器网络流控制的优化和挖掘分布式事件触发算法的性能优势,需要更深入地研究如下几点内容:

- 1) 考虑动态路由时的无线传感器网络流控制问题;
- 2) 仿真分析和理论上证明存在传输延时和数据包丢失时分布式事件触发算法的收敛性;
- 3) 仿真分析和理论上证明网络存在非线性约束时分布式事件触发算法的性能.

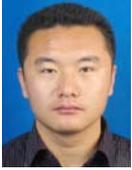
References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks (Elsevier)*, 2002, 38(4):393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [2] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1290 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.html>
- [3] Dietrich I, Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2009,5(1):1–39. [doi: 10.1145/1464420.1464425]
- [4] He SB, Chen JM, Yau DKY, Shao HY, Sun YX. Energy-Efficient capture of stochastic events by global- and local- periodic network coverage. In: *Proc. of the ACM MobiHoc*. New York, 2009. 155–164. [doi: 10.1145/1530748.1530769]
- [5] Chen JM, Xu WQ, He SB, Sun YX, Thulasiraman P, Shen XM. Utility-Based asynchronous flow control algorithm for wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010,28(7):1116–1125. [doi: 10.1109/JSAC.2010.100916]
- [6] Low SH, Lapsley DE. Optimization flow control, I: Basic algorithm and convergence. *IEEE/ACM Trans. on Networks*, 1999,7(6): 861–874. [doi: 10.1109/90.811451]

- [7] Cai L, Shen XM, Pan JP, Mark JW. Performance analysis of TCP-friendly AIMD algorithms for multimedia applications. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2005,7(6):339–355. [doi: 10.1109/TMM.2005.843360]
- [8] Kelly FP, Maulloo AK, Tan DKH. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society*, 1998,42(6):697–716.
- [9] Chiang M, Low SH, Calderbank AR, Doyle JC. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. *Proc. of the IEEE*, 2007,95(1):255–312. [doi: 10.1109/JPROC.2006.887322]
- [10] Lin XJ, Shroff NB, Srikant R. A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks. *IEEE Journal of Selected Areas Communications*, 2006,24(8):1452–1463. [doi: 10.1109/JSAC.2006.879351]
- [11] Palomar DP, Chiang M. Alternative distributed algorithm for network utility maximization: Framework and applications. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2007,52(12):2254–2269. [doi: 10.1109/TAC.2007.910665]
- [12] Johansson B, Soldati P, Johansson M. Mathematical decomposition techniques for distributed cross-layer optimization of data networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2006,24(8):1535–1547. [doi: 10.1109/JSAC.2006.879364]
- [13] Chiang M. Balancing transport and physical layers in wireless multihop networks: Jointly optimal congestion control and power control. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2005,23(1):104–116. [doi: 10.1109/JSAC.2004.837347(410)23]
- [14] Xue Y, Li B, Nahrstedt K. Optimal resource allocation in wireless ad hoc networks: A price-based approach. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,5(4):347–364. [doi: 10.1109/TMC.2006.1599404]
- [15] Wang X, Kar K. Cross-Layer rate optimization for proportional fairness in multi-hop wireless networks with random access. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2006,24(8):1548–1559. [doi: 10.1109/JSAC.2006.879365]
- [16] Srinivasan V, Chiasserini CF, Nuggehalli PS, Rao RR. Optimal rate allocation for energy-efficient multipath routing in wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004,3(3):891–899. [doi: 10.1109/TWC.2004.826343]
- [17] Zhu JH, Hung KL, Bensaou B, Nait-Abdesselam F. Rate-Lifetime tradeoff for reliable communication in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2008,52(1):25–43. [doi: 10.1016/j.comnet.2007.09.011]
- [18] Yuen K, Liang B, Li BC. A distributed framework for correlated data gathering in sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2008,57(1):578–593. [doi: 10.1109/TVT.2007.905243]
- [19] Pradeep CW, Marian C, Matti LA, Anthony E. Resource allocation for cross-layer utility maximization in wireless networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011,66(6):2790–2809. [doi: 10.1109/TVT.2011.2157544]
- [20] Huang PK, Lin XJ, Wang CC. A low-complexity congestion control and scheduling algorithm for multihop wireless networks with order-optimal per-flow delay. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. 2011. 2588–2596. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935085]
- [21] Zhao M, Yang YY. Optimization-Based distributed algorithms for mobile data gathering in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2012,11(10):1464–1477. [doi: 10.1109/TMC.2011.178]
- [22] Jin J, Sridharan A, Krishnamacari B, Palaniswami M. Handling inelastic traffic in wireless sensor networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2010,28(7):1105–1115. [doi: 10.1109/JSAC.2010.100915]
- [23] Sridharan A, Krishnamachari B. Explicit and precise rate control for wireless sensor networks. In: *Proc. of the 7th ACM SenSys*. New York, 2009. 29–42. [doi: 10.1145/1644038.1644042]
- [24] Wan, P, Lemmon, MD. Distributed network utility maximization using event-triggered augmented lagrangian methods. In: *Proc. of the American Control Conf.*, 2009. 3298–3303. [doi: 10.1109/ACC.2009.5160088]
- [25] Madan R, Lall S. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006,5(8):2185–2193. [doi: 10.1109/TWC.2006.1687734]
- [26] Xu WQ, Wu TJ, Wang YM, Zhang YH, Chen JM. Congestion control for high dynamic ad hoc networks: Price cooperation and receding optimization. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2008,19(9):2389–2402 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2389.html> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02389]
- [27] Wang WH, Palaniswami M, Low SH. Application-Oriented flow control: fundamentals, algorithms and fairness. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2006,14(6):1282–1291. [doi: 10.1109/TNET.2006.886318]
- [28] Bertsekas D. *Nonlinear Programming*. Athena Scientific, 1999. 388–421.
- [29] Chen BJ, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *ACM Wireless Networks Journal*, 2002,8(5):481–494. [doi: 10.1023/A:1016542229220]

附中文参考文献:

- [2] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1290. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.html>
- [26] 徐伟强, 吴铁军, 汪亚明, 张云华, 陈积明. 强动态 Ad Hoc 网的拥塞控制: 价格协作和滚动优化. 软件学报, 2008, 19(9): 2389-2402. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2389.html> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02389]



温书胜(1986—), 男, 河南濮阳人, 硕士, 主要研究领域为无线传感器网络, 充电式无线传感器网络.

E-mail: shusheng8688@163.com



黄炯(1977—), 男, 讲师, 主要研究领域为无线网络, 网络协议, 电子商务.

E-mail: hj_edu03@126.com



舒挺(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为协议形式化测试, Ad Hoc 网络.

E-mail: shuting@zstu.edu.cn



徐伟强(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为 Ad Hoc 网络, 无线传感器网络, 拥塞控制, 网络资源优化分配, 跨层优化.

E-mail: wqxu@zstu.edu.cn



汪亚明(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机图像, 运动估计, 计算机网络, 智能算法.

E-mail: ywang@zstu.edu.cn