

QoS 区分的无线通信仿生建模

王万良¹,姚信威¹,岑跃峰¹,杨双华²

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023; 2. 英国拉夫堡大学计算机系, 英国拉夫堡 LE11 3TU)

摘 要: 为了实现动态网络环境下的自适应 QoS 区分服务, 提出了 QoS 区分的无线通信仿生竞争模型, 模型借用 LV(Lotka-Volterra)生物竞争模型的思想, 建立生态系统与无线网络之间的映射关系, 同时结合 IEEE 802.11e 协议设置不同优先级, 并将模型瞬时输出值和稳态输出值作为各数据流的发送速率. 与传统的 QoS 区分服务机制 EDCA 相比, 显著提高了网络系统自适应性和快速收敛性, 对突发数据流具有很强的抗扰动性, 同时有效改善了数据传输友好性, 避免了网络拥塞.

关键词: QoS 区分服务; 仿生竞争模型; LV 模型; 拥塞

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1660-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.033

Bio-inspired Model for Wireless Communications with Differential QoS

WANG Wan-Liang¹, YAO Xin-Wei¹, CEN Yue-Feng¹, YANG Shuang-Hua²

(1. College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. Department of Computer Science, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, UK)

Abstract: To solve the different Quality of Services(QoS) for data flows over wireless networks, based on the classical LV (Lotka-Volterra) model, this paper proposes a bio-inspired competition models for differential QoS services. The mapping relationship between wireless networks and ecosystem is set up. Traffic flows will be assigned with different priorities according to IEEE 802.11e protocol, and its sending rate can be calculated as the output of the proposed model through limited iterations(e.g. instantaneous value and steady-state value). The simulation results reveal that the proposed model achieves better performance than EDCA in terms of adaptability, scalability and fairness.

Key words: QoS differential services; bio-inspired competition model; LV model; congestion

1 引言

目前各种网络服务层出不穷, 不同的服务具有不同的服务质量 QoS 要求^[1]. 为了给网络业务传输提供一定程度的 QoS 服务支持, IEEE 802.11 工作组提出了 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 协议为不同类型的业务提供具有优先级区分的传输服务, 使得网络中高优先级数据流优先获得 MAC 层传输^[2]. 目前大量文献借助仿真工具分析了基于 IEEE 802.11e EDCA 而改进的协议的 QoS 区分服务性能^[3,4]; 同时, 部分文献通过建立数学模型(Markov 链)对其进行理论性能分析^[5]. 虽然上述算法和模型局部地改善了 802.11e EDCA 区分服务的 QoS 性能, 但未考虑如何在满足 QoS 区分的基础上保证网络友好性传输和防止网络拥塞, 同时未考虑突发数据流的影响和无规则的网络资源管理.

为了解决上述难题, 研究者相继提出了一些基于速率的自适应算法^[6,7]和网络资源管理机制^[8-10]以避免网络拥塞, 但缺乏考虑不同网络业务间的 QoS 区分, 同时上述方法都采用被动的拥塞避免机制^[11]. 因此亟需设计新的具有自适应性和传输友好性的区分不同服务质量要求的拥塞控制机制.

结合生物智能和生态学的演化机制和模型, 本文提出了基于 QoS 区分的自适应仿生竞争机制. 基于 LV 生物竞争模型, 建立了 QoS 区分的网络业务竞争模型. 该模型根据动态网络环境, 在区分服务和业务友好性的基础上, 合理有效的分配网络资源, 综合考虑同类网络业务间的种内竞争和异类网络业务间的种间竞争, 保证在突发数据流下的网络传输性能和系统稳定性. 通过模型快速迭代计算, 将系统稳态值确定为各数据流的最佳发送速率.

本文组织如下:第 2 节介绍 Lotka-Volterra 生物竞争模型.第 3 节提出 QoS 区分仿生竞争模型.第 4 节对模型进行分析.第 5 节对模型性能进行验证.最后对全文工作进行总结.

2 Lotka-Volterra 生物竞争模型

当我们仔细观察大自然的生态系统时,会惊奇地发现生态系统所具有的动态性、智能性和规则性,这些不需要外界驱动的生态规则制约着自然资源分配、各种群间相互竞争、种群内部协作分工等.著名的 LV 竞争模型表达了物种在有限环境中种群所呈现的逻辑斯谛增长形式.许多研究者提出了基于 LV 模型的 TCP 拥塞控制机制^[12,13],同时 Antoniou 也将该生态竞争平衡模型引入无线传感器网络^[14].然而这些算法假设所有数据流具有相同优先级,同时调整所有数据流至相同的发送速率,实现“友好”的共享网络资源,却忽略了网络业务间的差异性和重要性.

本文将整个网络近似看成一个多物种动态共存的生态系统.建立基于 QoS 区分的仿生模型的关键在于寻找网络与生态系统的共同点,即如何将网络映射至生态系统.一个生态系统有许多不同的物种组成,它们一起共同生活,又相互竞争维持生命所需的有限环境资源.类似地,一个无线网络包括许多网络节点,每个节点类似于一个小型生态系统,具有有限的缓存空间和带宽,能产生不同优先级的数据流.单个数据流类似于生态系统的某个物种,而某相同优先级的数据流集合类似于生态系统的某类物种.同时,各数据流相互竞争可用的网络资源,其发送速率对应于生态系统中各物种的人口数量.映射后的网络系统以各优先级数据流共存(友好并发传输)为目标.

从宏观层面,各节点在需要传送数据时相互竞争无线信道,抢占有限带宽.同时,每个节点都含有额定大小的缓存区用于存储待发送的数据流.根据上述共同点,通过以下三个对应关系,就可建立无线网络的仿生竞争模型:(a)有限的无线网络带宽对应于生态系统中的环境资源;(b)每个数据流的发送速率变化对应于物种的数量变化;(c)物种共存对应于每个数据流并发传输.为便于表述,下文中物种和数据流两个概念等价.

从微观层面,无线网络系统映射至基于 LV 模型的生态系统遵循以下规则:

(1) 在竞争环境下,物种 i 以给定的速率 r_i 繁殖.

(2) 物种 i 数量以系数 β_i 减少, β_i 表示物种 i 内部的相互竞争,与物种 i 自身规模成比例.

(3) 物种 i 数量以系数 α_{ij} 减少, α_{ij} 表示物种 j 对物种 i 的种间竞争,与物种 j 规模成比例.

如果 $\sum \alpha_{ij} < \beta_i$,表示此时生态系统中种内竞争大于种间竞争.根据上述规则,可得基于 n 个物种的 Lotka-Volterra 生态系统常微分方程:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = x_i(t) \left(r_i - \frac{\beta_i r_i}{N_i} x_i(t) - \frac{r_i}{N_i} \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n \alpha_{ij} x_j(t) \right) \right) \quad (1)$$

其中 $i = 1, \dots, n$ 表示物种的种类, $x_i(t)$ 表示物种 i 在 t 时刻的种群数量(其中 $x_i(t) \geq 0$), N_i/β_i 表示物种 i 的最大规模(令 $dx_i(t)/dt = 0$ 求得),当 $\beta_i = 1$ 并且周围环境中没有其他种群($x_j(t) = 0$)时,物种 i 独享所有的环境资源,其物种数量达到环境所允许、所能承受的最大值 N_i .

3 QoS 区分的仿生竞争模型——QoS-Bi 模型

由于传统 802.11e 协议中各优先级参数被预先静态设置,无法保证网络业务在 QoS 区分基础上的友好性传输,当网络中高优先级业务负载较轻时,低优先级业务占用信道的机会较少,导致网络资源利用率较低;当高优先级业务负载较重时,低优先级业务几乎没有机会获取信道发送数据.同时,又缺乏对网络拥塞的主动预防和排除机制.为解决上述问题,本文提出了基于 IEEE 802.11e 协议的 QoS 区分的仿生竞争模型——QoS-Bi 模型.该模型具有“主动”防止网络拥塞功能,每个网络节点智能感知自身的数据流,并合理分配各个数据流的发送速率,有效解决突发数据流和网络资源利用问题,在区分服务的基础上实现各优先级数据流友好性传输.

IEEE 802.11e 通过设置不同的帧间隔(AIFS)、最大/最小窗口和传输机会四个参数实现区分服务,帧间隔越小表示数据流等待时间越短,占用信道的机会越大,如图 1 所示.因此,帧间隔大小直接影响着该优先级网络业务的传输概率,如生态系统中食物链的分布,优先级越高(即帧间隔越小),表示该网络业务处于食物链的顶端,它的传输将直接妨碍低优先级数据的传输,甚至导致低优先级数据无法传输.而低优先级数据流必须等待较长的信道空闲时间才有机会发送数据,甚至在等待的过程中,如果有高优先级数据需要被传输,则高优先级数据会先占用信道并发送数据,低优先级数据将会延缓发送. IEEE 802.11e 标准推荐, $\text{prio}_3(x_3)$ 和

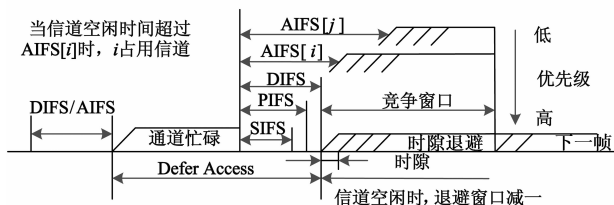


图1 802.11e 信道获取过程

prio_2 (x_2) 具有相同的帧间隔值且最小均为 2, prio_1 (x_1) 的帧间隔值为 3, prio_0 (x_0) 的帧间隔值为 7.

因此本文重点考虑帧间隔对信道竞争的影响, 并忽略低优先级数据流对高优先级数据流的影响: 种群 x_3 和 x_2 相互竞争影响, 不受低优先级种群 x_1 和 x_0 的影响; 种群 x_1 优先级高于 x_0 而不受其影响, 但受高优先级种群 x_3 、 x_2 的竞争; 种群 x_0 帧间隔值最大, 优先级最低, 需要和所有的种群竞争信道. 因此 4 类数据流之间的竞争系数可以表示为:

$$\begin{cases} \alpha_{ij} > 0, & 0 \leq i < j \leq 3 \\ \alpha_{ij} > 0, & i = 3, j = 2 \\ \alpha_{ij} = 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

根据区分服务的网络传输机制, 结合 LV 模型和竞争系数, QoS-Bi 模型可以表示如下:

$$\begin{cases} \frac{dx_3(t)}{dt} = r_3 x_3 \left[\left(1 - \frac{\beta x_3}{N_3} \right) - \alpha_{32} \frac{x_2}{N_2} \right] \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = r_2 x_2 \left[\left(1 - \frac{\beta x_2}{N_2} \right) - \alpha_{23} \frac{x_3}{N_3} \right] \\ \frac{dx_1(t)}{dt} = r_1 x_1 \left[\left(1 - \frac{\beta x_1}{N_1} \right) - \alpha_{13} \frac{x_3}{N_3} - \alpha_{12} \frac{x_2}{N_2} \right] \\ \frac{dx_0(t)}{dt} = r_0 x_0 \left[\left(1 - \frac{\beta x_0}{N_0} \right) - \alpha_{03} \frac{x_3}{N_3} - \alpha_{02} \frac{x_2}{N_2} - \alpha_{01} \frac{x_1}{N_1} \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中 $x_3(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_1(t)$ 和 $x_0(t)$ 依次表示 t 时刻优先级从高到低的种群数量, 即 t 时刻各优先级数据发送速率. QoS-Bi 模型将 4 类网络数据流看作生态系统中的 4 个物种, 同时该模型集成生态系统优点, 在实现 QoS 区分服务的基础上保持各网络业务友好性传输, 引入了网络带宽限制, 既主动有效地避免网络拥塞, 同时又保证网络资源得到充分利用.

4 稳定性分析

竞争模型 QoS-Bi 是动态变化的, 各优先级数据的发送速率也将随着网络条件、突发数据流而动态变化, 因此获取任意时刻各数据流的发送速率, 对于检验模型的合理性和有效性具有重要的意义. 根据一阶常微分方程(2)求解可得各优先级数据的实时发送速率如下:

$$\begin{aligned} x_3(t) &= \frac{N_3 w_3 x_3(0)}{\beta N_2 x_3(0) + [N_3 w_3 - \beta N_2 x_3(0)] e^{-\frac{w_3 r_3}{N_2} t}} \\ x_2(t) &= \frac{N_2 w_2 x_2(0)}{\beta N_3 x_2(0) + [N_2 w_2 - \beta N_3 x_2(0)] e^{-\frac{w_2 r_2}{N_3} t}} \\ x_1(t) &= \frac{N_1 (N_2 N_3 - w_1) x_1(0)}{N_2 N_3 \beta x_1(0) + \varphi_1 e^{-\frac{N_2 N_3 - w_1}{N_2 N_3} r_1 t}} \end{aligned}$$

$$x_0(t) = \frac{N_0 (N_1 N_2 N_3 - w_0) \cdot x_0(0)}{\beta N_1 N_2 N_3 x_0(0) + \varphi_0 e^{-\frac{N_1 N_2 N_3 - w_0}{N_1 N_2 N_3} r_0 t}}$$

其中

$$\begin{aligned} w_3 &= N_2 - \alpha_{32} x_2 \\ w_2 &= N_3 - \alpha_{23} x_3 \\ w_1 &= N_2 \alpha_{13} x_3 + N_3 \alpha_{12} x_2 \\ w_0 &= N_1 N_2 \alpha_{03} x_3 + N_1 N_3 \alpha_{02} x_2 + N_2 N_3 \alpha_{01} x_1 \\ \varphi_1 &= N_1 (N_2 N_3 - w_1) - \beta N_2 N_3 x_1(0) \\ \varphi_0 &= N_0 (N_1 N_2 N_3 - w_0) - \beta N_1 N_2 N_3 x_0(0) \end{aligned}$$

由于生态系统是动态平衡的, 生物进化和群落演替过程中包含不断打破旧的平衡, 建立新平衡的过程, 同时保持生物种类的组成和数量比例相对稳定. QoS-Bi 模型考虑各优先级业务间的相互竞争, 可以动态适应突发数据流的状况, 保证系统稳定性和收敛性. 通过求解公式(2) $\frac{dx^*(t)}{dt} = 0$ 可得 16 个系统稳定点, 但为了保持生态系统平衡, 4 种生物中的某一种或几种不灭绝, 即 4 类数据流可以共存并发传输, 当且仅当稳定点中的 x_0^* 、 x_1^* 、 x_2^* 和 x_3^* 都大于零才有实际意义. 因此可得最佳稳定点如公式(3)所示:

$$\begin{cases} x_3^* = \frac{\alpha_{32} - \beta}{\alpha_{23} \alpha_{32} - \beta^2} N_3 \\ x_2^* = \frac{\alpha_{23} - \beta}{\alpha_{23} \alpha_{32} - \beta^2} N_2 \\ x_1^* = \frac{N_1}{\beta} \left[1 - \frac{\alpha_{12} (\alpha_{23} - \beta) + \alpha_{13} (\alpha_{32} - \beta)}{\alpha_{23} \alpha_{32} - \beta^2} \right] \\ x_0^* = \frac{N_0}{\beta} \left\{ 1 - \frac{\alpha_{03} (\alpha_{32} - \beta) + \alpha_{02} (\alpha_{23} - \beta)}{\alpha_{23} \alpha_{32} - \beta^2} \right. \\ \left. - \frac{\alpha_{01}}{\beta} \left[1 - \frac{\alpha_{13} (\alpha_{32} - \beta) + \alpha_{12} (\alpha_{23} - \beta)}{\alpha_{23} \alpha_{32} - \beta^2} \right] \right\} \end{cases} \quad (3)$$

5 仿真分析

为模拟真实的网络场景和对前面的理论分析进行仿真验证, 本节采用网络仿真器 NS2 和 MATLAB 进行仿真, 模型基本参数设置见表 1 (可以根据实际的应用环境调整各参数, 实现特定的 QoS 区分服务需求). 不考虑不同优先级数据的内部竞争差异性, 即假设各类数据流的内部竞争系数 β 均相同. 分析在有两种不同场景中, QoS-Bi 模型的可扩展性、收敛性和自适应性等方

表 1 模型基本参数设置

参数	值	参数	值	参数	值	参数	值
α_{01}	1	α_{13}	1.3	r_1	1	N_1	1024
α_{02}	1.4	α_{23}	1.1	r_2	1	N_2	1024
α_{03}	1.5	α_{32}	1	r_3	1	N_3	1024
α_{12}	1.2	r_0	1	N_0	1024	β	4

面的性能.本文以秒为时间间隔计算数据流发送速率和吞吐量.

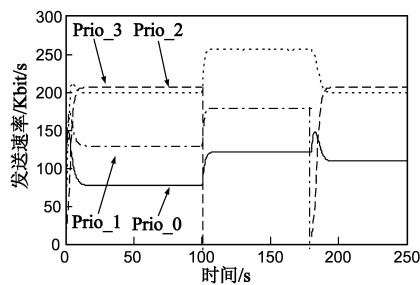
5.1 系统自适应性和稳定性

为了验证 QoS-Bi 模型的自适应性和稳定性,分析其在不同种群内部竞争系数和随机突发数据流条件下的网络传输性能.表 2 显示了内部竞争系数 $\beta = 1$ 的两组随机实验,每组实验都包含 3 个随机状态,每个随机状态表示某个突发数据流的产生或消失,平衡态则表示对应于某个随机状态之后稳定输出值,即各种群保持相对稳定,达到平衡状态.当 4 类优先级种群并存时,如随机实验 1 状态 1 所示,给定初始值和模型参数,就能通过 QoS-Bi 模型得到各优先级数据流的稳态发送速率,即达到平衡态 (76.6Kb/s, 129.2Kb/s, 199.3Kb/s, 206.1Kb/s),与 802.11e 平衡态 (2Kb/s, 45.2Kb/s, 150.1Kb/s, 474.8Kb/s)相比, QoS-Bi 模型在实现区分服务的基础上又保障了各优先级的 QoS 需求,同时满足了所有网络业务的友好性传输,低优先级数据流发送速率从 2Kb/s 提高到 76.6Kb/s.

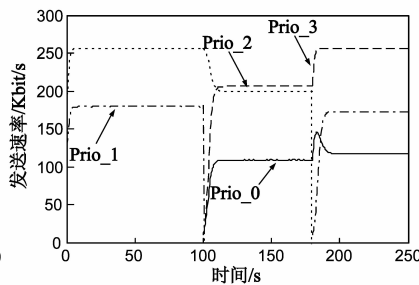
表 2 当 $\beta = 1$ 时各随机状态下的系统平衡结果

实验	数据流 (Kb/s)	状态 1	平衡 1	状态 2	平衡 2	状态 3	平衡 3
		0.0s	~ 100s	100s	~ 180s	180s	~ 250s
随机 1	Prio_0	100	76.6	76.6	121.6	121.6	108.9
	Prio_1	80	129.2	129.2	179.2	0	0
	Prio_2	40	199.3	199.3	256.0	256.0	199.3
	Prio_3	10	206.1	0	0	10	206.1
随机 2	Prio_0	0	0	10	108.9	108.9	116.8
	Prio_1	100	179.2	0	0	10	172.8
	Prio_2	150	256.0	256.0	199.3	0	0
	Prio_3	0	0	10	206.1	206.1	256.0

从图 2 可以看到,无论网络状态发生怎样的变化, QoS-Bi 模型在任意突发数据流下都能快速收敛至稳定状态.在突发数据流的影响下,各优先级种群数量都会发生波动,但在短时间内收敛至稳定点,系统抗扰动性较好.同时,在特定的优先级种群组合下,系统稳定点



(a) 随机1



(b) 随机2

图2 不同随机实验条件下QoS-B模型性能

始终保持唯一,与原有的种群组合状态和突发数据流无关,能适应动态的网络变化.

5.2 参数性能分析

为分析种内竞争系数对 QoS-Bi 模型稳态输出值的影响,在 5.1 基础上,设置相同的网络场景(各优先级种群初始值均为 10Kb/s),通过改变 β 值,分析系统平衡时各优先级的传输速率、数据包发送数量.图 3 所示,随着 β 值的增大,宏观上,每个优先级种群的稳态输出值成“阶梯状”逐渐降低,同时保持优先级区分,即满足不同网络业务的区分服务.这是由于稳态输出值与种内竞争系数成反比关系,如公式(3)所示,同时在建立 QoS-Bi 模型时充分考虑不同网络业务的 QoS 需求.

微观上,由于各优先级种群内部竞争加剧,系统的主要竞争由种间竞争转化为种内竞争,种内竞争增大表示系统需要提供比原来更多的资源(带宽)来供给单个个体(即数据流)的生存,当系统总资源固定有限时,种内竞争加剧将导致种群数量锐减;同时,相对稳定的种间竞争成为影响系统稳定的次要因素,因此系统所需稳定时间逐渐减少,而且当系统达到稳态时,各种群的输出值差异也逐渐缩小.图 4 显示随着种内竞争的增大,各优先级数据流的实际数据包发送数量差距逐渐减小,但该曲面始终倾斜,即 QoS-Bi 模型始终保持各数据流的区分服务.通过分析曲面的形状和趋势,有助于选择合理的种内竞争值满足特定网络场景下的数据传输需求.

5.3 算法性能对比

为了考察 QoS-Bi 模型的传输性能,对比现有无线网络广泛使用的区分服务机制 IEEE 802.11e EDCA 机制,对同样的网络变化场景(5.1 节中随机 1 和随机 2 实验场景)进行了测试.图 5 显示了 EDCA 机制下不同优先级数据流的实时吞吐量.对比图 2 和图 5 可以得出以下结论:(1)无论网络状态是否发生变化,采用 EDCA 机制各数据流所获得的发送速率(吞吐量)始终处于振荡中,并不收敛于任何一个稳定的值,这将导致传递数据质量的波动;(2)QoS-Bi 模型可以获得平滑的吞吐量,

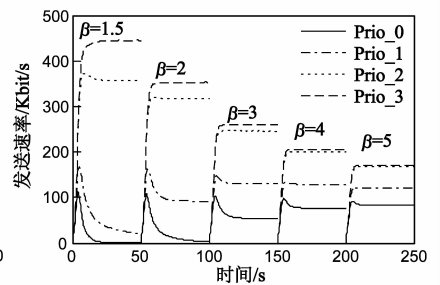


图3 不同 β 值下的各优先级数据流的发送速率

尤其在突变的网络情形下能快速收敛至稳定值,并保持各数据流传输的差异性和友好性;(3)由于 EDCA 机制采用静态的帧间隔值、竞争窗口大小等实现不同优先级数据的区分服务,从而导致高优先级数据流占据绝大部分的网络带宽(如图 5(b) 180s ~ 250s 所示),即

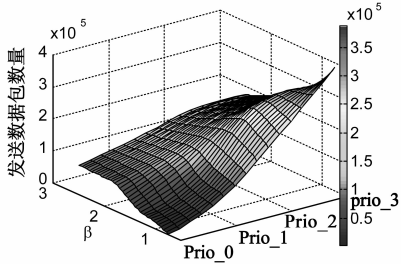


图4 不同 β 值下的各优先级数据流的数据发送变化

6 总结

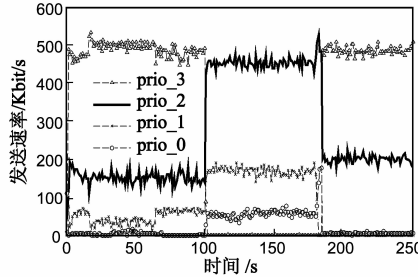
基于生物启发的网络技术是智能网络技术的研究重点和热点. 寻求一种好的仿生技术对于提高整个网络的智能性、自适应性和高效性有着重要的意义. 本文提出了一种 QoS 区分的无线网络仿生竞争模型 QoS-Bi, 基于 IEEE 802.11e 协议通过控制每个数据流的实时发送速率, 在任意动态突发数据流下, 系统始终具有优越的稳定性和自适应性, 同时保持友好性传输和避免网络拥塞.

实验表明, 与传统区分服务机制相比, QoS-Bi 模型不仅可以网络变化动态调整各优先级数据传输, 而且能快速收敛至系统稳定状态, 抗干扰能力强. 同时分析了数据流内部竞争值 β 对吞吐率、发送速率和传输效率等的影响. 下一步工作将考虑利用生物优化技术进行模型参数优化; 同时, 针对能量有限和计算能力较差的无线传感网, 还需要进一步考虑能量优化和算法简化.

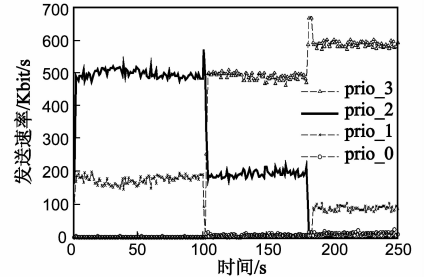
参考文献

- [1] 孙岩, 马华东. 无线多媒体传感器网络 QoS 保障问题[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1412 - 1420.
Sun Yan, Ma Hua-dong. The QoS guarantee problem for wireless multimedia sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1412 - 1420. (in Chinese)
- [2] IEEE 802. 11. Wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer (PHY) specifications[S].
- [3] Majkowski J, Palacio F C. Dynamic TXOP configuration for QoS enhancement in IEEE 802. 11e wireless LAN[A]. International Conference on Software in Telecommunications and Computer Networks[C]. Split-Dubrovnik, IEEE, 2006. 66 - 70.

使在低网络负载的环境下, 低优先级数据流未能充分利用网络带宽. 同时, QoS-Bi 模型提供了一个开放的模型, 用户可以选择合适的竞争参数 α 和 β 实现特定的区分服务需求.



(a) 随机1(EDCA)



(b) 随机2(EDCA)

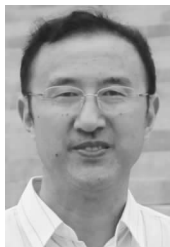
图5 不同随机实验条件下EDCA协议性能

- [4] Siris V A, Courcoubetis C. Resource control for the EDCA mechanism in multi-rate IEEE 802. 11e networks[A]. International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks[C]. New York, IEEE, 2006. 419 - 428.
- [5] Lee J Y, Lee H S. A performance analysis model for IEEE 802. 11e EDCA under saturation condition[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(1): 56 - 63.
- [6] Sumit R, Ramakrishna G, Ramesh G, et al. Interference-aware fair rate control in wireless sensor networks[A]. In Proceedings of SIGCOMM'06[C]. Pisa, ACM, 2006, 63 - 74.
- [7] Popa L, Raiciu C, Stoica I, et al. Reducing congestion effects in wireless networks by multipath routing[A]. In Proceedings of 14th IEEE International Conference on Network Protocols[C]. California, IEEE, 2006. 96 - 105.
- [8] Wsn C Y, Eisenman S B, Campbell A T, et al. Siphon: Overload traffic management using multi-radio virtual sinks in sensor networks[A]. Proceedings of ACM SenSys'05[C]. San Diego, ACM, 2005. 116 - 129.
- [9] Kyriskos K, Vana K, Srikanth V K. Cluster-based congestion control for sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2008, 4(1): 1 - 31.
- [10] 张玉鹏, 刘凯, 王广学. 基于无线传感器网络的跨层拥塞控制协议[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2258 - 2262.
Zhang Yu-peng, Liu Kai, Wang Guang-xue. Cross-layer congestion control for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10): 2258 - 2262. (in Chinese)
- [11] Wan C Y, Eisenman S B, Campbell A T. Energy-Efficient congestion detection and avoidance in sensor networks[J]. ACM Transactions on sensor networks(TOSN), 2011, 7(4), 1 - 31.
- [12] Iguchi T, Hasegawa G, Murata M. A new congestion control Mechanism of TCP with inline network measurement[J]. Information Networking, 2005, 3391: 109 - 121.

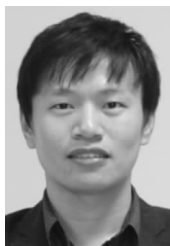
[13] Hasegawa G, Murata M. TCP symbiosis: Congestion control mechanisms of TCP based on Lotka-Volterra competition model[A]. In Proceedings from the 2006 Workshop on Interdisciplinary Systems Approach in Performance Evaluation and Design of Computer & Communications Systems[C]. Pisa, ACM, 2006. 11 – 20.

[14] Aatiou P, Pitsillides A. A bio-inspired approach for streaming applications in wireless sensor networks based on the Lotka-Volterra competition model [J]. Computer communications, 2010, 33(17): 2039 – 2047.

作者简介



王万良 男, 1957 年生于江苏高邮. 浙江工业大学计算机科学与技术学院院长. 研究方向为计算机智能、自动化、无线网络.
E-mail: wwl@zjut.edu.cn



姚信威 男, 1986 年生于浙江诸暨. 浙江工业大学博士研究生, 研究方向为无线多媒体通信、网络优化.
E-mail: yxw_zjut@hotmail.com

电子学报

2013 年第 8 期 Acta Electronica Sinica No.8 2013

(总第 366 期) (Monthly) (Series No.366)

主管单位 中国科学技术协会
主办单位 中国电子学会
编辑 《电子学报》编辑委员会
主编 李衍达
总编辑 刘力
通信地址 北京 165 信箱
(邮政编码 100036)
电话 (010)68279116, 68285082
传真 (010)68173796
主页 <http://www.ejournal.org.cn>
电子邮箱 new@ejournal.org.cn
排版印刷 北京墨禹天成印刷有限公司

China Association for Science and Technology
Published by the Chinese Institute of Electronics
Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
Chief Editor: LI Yan-da
Director: LIU Li
Add: Editorial Office of Acta Electronica Sinica,
P. O. Box 165, Beijing 100036, China
Tel: 86-10-68279116, 68285082
Fax: 86-10-68173796

国内总发行 北京市报刊发行局
国外总发行 中国国际图书贸易总公司
国内订购处 全国各邮电局
中邮阅读网 <http://www.183read.com>

Printed by Moyutiancheng Co. Ltd., Beijing, China
Distributed by
Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China
Foreign: China International Book Trading Corporation
Subscription Office—All Local Post Offices in China