

用于无线传感器网络的比例公平队列调度算法

黄建辉¹, 钱德沛^{1,2}, 王胜灵¹, 刘轶^{1,2}

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 北京航空航天大学计算机科学与工程学院, 100083, 北京)

摘要: 提出了一种适用于无线传感器网络的比例公平队列调度算法, 该算法以不同业务类别的平均分组到达率为依据, 通过为不同业务类别分配服务配额, 在加权轮询调度(WRR)算法的基础上可实现比例公平的平均分组传输时延和平均分组丢弃率。由于所提算法仅以不同业务类别的平均分组到达率为依据, 无需执行加时间戳、根据时间戳排队等复杂操作, 所以更适用于资源受限的无线传感器网络。经搭建的实际环境测试发现, 当以平均分组传输时延为评价参数时, 所提算法可实现比例公平的平均分组传输时延, 当所有队列都发生丢弃且以平均分组丢弃率为评价参数时, 可实现比例公平的平均分组丢弃率。

关键词: 无线传感器网络; 加权轮询调度; 比例公平

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0129-04

Proportional Fairness Scheduling Algorithm Used for Wireless Sensor Network

HUANG Jianhui¹, QIAN Depei^{1,2}, WANG Shengling¹, LIU Yi^{1,2}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A scheduling algorithm used for wireless sensor network (WSN) was proposed to realize the proportional fairness principle. Based on the weighted round robin (WRR) algorithm, the proposed scheduling algorithm allocates different service ratios to different traffics according to their average packet arrival rates to guarantee proportion fairness on the average packet delivery delays and the average packet loss ratios. Since the scheduling algorithm does not perform the operations such as adding time stamps, sorting and so on, it can be implemented easily and is suitable for WSN. The proposed algorithm is tested in a wireless sensor network. The performance shows that the scheduling algorithm can realize the average packet delivery delay proportional fairness when the average packet delay is used as the performance metric and the average packet loss rate proportional fairness is realized when all the queues are overflowing and the average packet loss is used as the performance metric.

Keywords: wireless sensor network; weighted round robin; proportional fairness

由于数据采集、环境法监控法的广泛应用, 所以无线传感器网络(WSN)^[1]也成为研究的热点, 但目前大都集中于单一的“尽力而为”的数据传输服务模式^[2]。在实际应用中, 同一个网络通常存在着几种不同属性的数据流, 且有不同的服务质量(QoS)要求,

因此能提供不同QoS保证的WSN正显示出广阔的应用前景^[2]。互联网工程任务组提出的差分服务模式^[3]以其可扩展、分布式管理和松散控制等优点, 在网络的QoS研究中被广泛采纳。

差分服务不能为应用和用户提供绝对的QoS,

如不能保证分组传输时延上限、最小吞吐量等,但根据用户所支付的价格^[4],差分服务网络可以保证高优先级业务的 QoS 优于低优先级业务的 QoS. 为此,Dovrolis 提出了从分组调度的角度来实现差分服务的原则(比例公平原则)^[5]. 通过该原则,网络资源可按照供应者给定的区分参数依比例来分配,使每个业务类的 QoS 依网络负载而变,而类间的 QoS 比值与负载无关.

目前,有关比例公平调度算法包括比例平均时延调度算法(PAD)^[5]、自适应比例时延区分服务(APDDS)^[6]和比例丢弃率公平算法(PLR)^[7],其中 PAD 和 APDDS 实现了比例公平的平均分组排队时延,PLR 实现了比例公平的平均分组丢弃率,但这 3 种算法均给系统引入了大量的额外计算负荷.

本文基于加权轮询调度(WRR),提出了一种通过控制各队列的分组发送配额来实现平均分组传输时延和平均分组丢弃率的比例公平的分组调度算法.

1 比例公平队列调度算法

1.1 比例公平原则

比例公平原则在于通过控制带宽资源的分配,使得各类业务在指定的 QoS 参数上符合给定的比例,且该比例不受网络负载影响. 若用 q_i^j ($i=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,n$) 代表第 i 个业务类的第 j 个性能参数, K 代表系统提供的业务类别总数, n 代表要保持比例公平的性能参数个数,则比例公平原则可表达为

$$q_1^j : q_2^j : \dots : q_K^j = Q_1^j : Q_2^j : \dots : Q_K^j \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, K; \quad j = 1, 2, \dots, n$

式中: Q_i^j ($i=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,n$) 是网络管理者为第 i 个性能参数指定的比值. 无论是传统的 IP 网络还是 WSN,平均分组传输时延和平均分组丢弃率都是主要的性能评价指标^[2],因此所提算法的目标是:实现以平均传输时延为参数的比例公平原则,或者当所有队列均发生分组丢弃时,实现以平均分组丢弃率为参数的比例公平原则.

1.2 比例公平的平均分组传输时延

为了对不同的业务类别进行区分处理,转发节点为每类业务设置了一个长度为 N 的缓冲队列,并采用轮询的方式调度各队列中的分组,且第 i 类业务对应的队列被标识为队列 i . 假设第 i ($i=1,2,\dots,K$) 类业务的分组到达率服从参数为 λ_i 的泊松分布,且分组的服务时间服从参数为 $1/\mu_i$ 的负指数分

布,则队列 i ($i=1,2,\dots,K$) 是一个 $M/M/1/N/\infty$ 系统,该系统的状态概率 P_i ($i=1,2,\dots,N$) 的转换关系如图 1 所示.

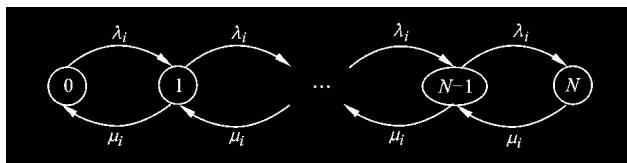


图 1 状态概率转换关系

从图 1 可知,系统的状态概率稳态方程为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i P_0 &= \mu_i P_1 \\ \lambda_i P_{n-1} + \mu_i P_{n+1} &= (\lambda_i + \mu_i) P_n \quad 1 \leq n \leq N-1 \\ \lambda_i P_{N-1} &= \mu_i P_N \\ \sum_{j=0}^N P_j &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

令 $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$, 则解方程(2)可得

$$P_j = \begin{cases} \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^{N+1}} \rho_i^j & \rho_i \neq 1 \\ \frac{1}{N+1} & \rho_i = 1 \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

由于该队列属于 $M/M/1/N/\infty$ 系统,所以其平均长度为

$$L_s = \sum_{n=0}^N n P_n = \begin{cases} \frac{\rho_i}{1 - \rho_i} - \frac{(N+1)\rho_i^{N+1}}{1 - \rho_i^{N+1}} & \rho_i \neq 1 \\ N/2 & \rho_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

根据以上推导,可得分组在队列中的平均驻留时间

$$W_s^i = \frac{L_s}{\lambda_i(1 - P_N)} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_i} \frac{(1 - \rho_i^N - N\rho_i^N + N\rho_i^{N+1})}{(1 - \rho_i - \rho_i^N + \rho_i^{N+1})} & \rho_i \neq 1 \\ \frac{1}{\mu_i} \frac{N}{2} & \rho_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

该驻留时间 W_s^i 为分组的排队时延和发送时延之和. 当队列容量 N 较大时,为了简化计算,可将式(5)的极限值作为近似真实值,即令 $\lim_{N \rightarrow \infty} W_s^i \approx \lim_{N \rightarrow \infty} W_s^i$, 从而式(5)的化简式为

$$W_s^i = \begin{cases} \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} & \mu_i < \lambda_i \\ \frac{N}{2\mu_i} & \mu_i = \lambda_i \\ \frac{N}{\mu_i} & \mu_i > \lambda_i \end{cases} \quad (6)$$

要实现比例公平的平均分组传输时延,需满足

$$W_s^1 : W_s^2 : \dots : W_s^K = d_1 : d_2 : \dots : d_K \quad (7)$$

式中: $d_1, d_2, \dots, d_K$ 是各业务类别的平均分组传输时延的比值. 由式(6)、式(7)可得

$$\left. \begin{aligned} W_s^1 : W_s^2 : \dots : W_s^K &= d_1 : d_2 : \dots : d_K \\ \sum_{i=1}^K \mu_i &= C \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

从式(6)可知,根据平均分组到达率与服务配额的关系, $W_s^i (i=1, 2, \dots, K)$ 会有 3 种不同的表达式,但在获得方程组正确解之前它们是无法确定的,所以式(8)可以采用试探排除法进行求解,即首先假设第 $i (i=1, 2, \dots, K)$ 类业务的平均分组到达率和服务配额符合 3 种关系中的某一种,再使用对应的表达式进行求解,然后检查所得解是否符合假设条件. 如果符合条件则为正确解,否则再次尝试其他假设. 在系统提供 K 个队列的情况下,要获得正确解需要试探假设次数的期望值为 $3^K/2$,而在实际应用中 $\mu_i = \lambda_i$ 出现的概率很小,所以通过优先试探 $\mu_i < \lambda_i$ 和 $\mu_i > \lambda_i$ 的情况可优化求解过程,使得试探次数的期望值接近 2^{K-1} . 不论采用哪种表达式,构成的方程组均为 K 元一次线性方程组,则使用直接法进行求解,再通过平均 $2^{K-1} \times 3(K-1)$ 次乘除法就可以计算出各队列的服务配额.

在发送分组时,只需要判断队列是否还有服务配额即可确定要发送的分组,所以算法的计算量主要集中于服务配额的求解上. 为了分析本文算法的性能优势,特与 PAD 算法在单位时间内的计算量进行对比. 在 PAD 算法中,每发送一个分组需要进行 $2N$ 次乘除法运算,设单位时间 t 内发送的分组数为 C_t ,则 PAD 算法的计算量为 $2NC_t$,而本文算法在计算量为 $2^{K-1} \times 3(K-1)(1 - \sum_{i=1}^K 1 - P_i)$,其中 $P_i (i=1, \dots, K)$ 为各类业务平均分组到达率发生变化的概率. 在最坏的情况下,即在 $P_i = 1$ 的情况下,本文算法在单位时间内的计算量为 $2^{K-1} \times 3(K-1)$. 根据本文的测试环境,假设 $t=1$,可得 $C_t = 103$. 通过对比可知,当 $K \leq 10$ 时,即业务类别不超过 10 类,本文算法的计算量要优于 PAD 算法,由于 APDDS 的计算量明显大于 PAD 算法,所以本文算法的计算量也小于 APDDS 算法. 在目前的差分服务模型中,规定最大业务类别数为 8,所以本算法可完全满足应用需求.

1.3 比例公平的平均分组丢弃率

当队列发生溢出时,队列会丢弃分组,出于公平

性的考虑,需保证各溢出队列在分组丢弃率上是比例公平的. 根据式(2)可知,在队列长度为 N 的情况下,队列满的概率为 P_N . 在队列满的情况下,新到达的分组会被丢弃,结合队列满的概率 P_N ,可得第 $i (i=1, 2, \dots, K)$ 类业务的平均分组丢弃率为

$$l_i = P_N^i \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

只有当系统的平均服务率小于平均分组到达率时,分组才被丢弃,因此根据式(3)及 1.2 节的化简方法,则有

$$P_N^i = \frac{(\lambda_i - \mu_i)}{\lambda_i} \quad \lambda_i > \mu_i \quad (10)$$

根据平均分组丢弃率的比例公平原则,各类业务的丢弃率 $l_i (i=1, 2, \dots, K)$ 应满足

$$l_1 : l_2 : \dots : l_K = L_1 : L_2 : \dots : L_K \quad (11)$$

式中: $L_1, L_2, \dots, L_K$ 是各类业务的平均分组丢弃率的比值. 联立式(9)~式(11)可得

$$\left. \begin{aligned} l_1 : l_2 : \dots : l_K &= L_1 : L_2 : \dots : L_K \\ \sum_{i=1}^K \mu_i &= C \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(12)可求得系统为各队列分配的服务配额,根据该配额进行轮询调度,即可保证各队列的平均分组丢弃率符合给定的比例. 与式(8)不同的是,式(12)的求解不需要进行试探,它是一个简单的 K 元一次线性方程组,用直接法通过 $3(N-1)$ 次乘除运算即可求得各队列的服务配额.

在 PLR 算法中,每丢弃一个分组,都要进行 $2N$ 次乘除和 $N-1$ 次比较操作,而在本文方案中,仅当各队列的平均分组到达率发生变化时,各队列的服务配额 $\mu_i (i=1, 2, \dots, N)$ 才需要更新. 根据 1.2 节的分析方法可知,本文方案的计算量要优于 PLR 算法. 此外,本文方案采用了被动丢弃方式,即当队列已满时自动丢弃新到的分组,无需单独运行丢弃过程,从而减少了系统开销.

通过上述分析表明,在实现比例公平的平均分组传输时延和分组丢弃率时,本文算法无需监测队列长度,只要获知各类业务的平均分组到达率便可通过调整各队列的服务率来保证使各队列的平均分组传输时延与分组丢弃率保持一定比例. 此外,由于服务配额分配仅与各类业务的平均分组到达率有关,所以在平均分组到达率不发生变化的情况下,无需重新分配服务率,从而进一步简化了调度算法,使得算法更适用于资源受限的 WSN.

2 性能测试

在实际的无线传感器网络中对本文算法进行了

验证.测试中,无线传输带宽为 250 kb/s,测试网络拓扑结构如图 2 所示.其中:节点 1~节点 3 为普通的传感器节点,分别负责采集温度、光线强度和磁场强度等信息,其 QoS 级别分别为 1 级~3 级,该值越大,优先级越小,且分组长度为 29 B;节点 4 只负责数据转发,并担任着比例公平的调度任务;节点 5 为网关;节点 6 负责数据处理.测试中规定各 QoS 级别的平均分组传输时延与平均分组丢弃率的比例为 1:2:3,其中分组传输时延是指从分组发送节点到网关节点的单向传输时延.

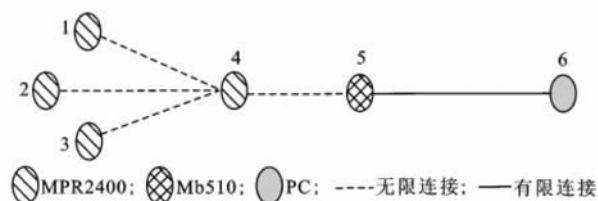
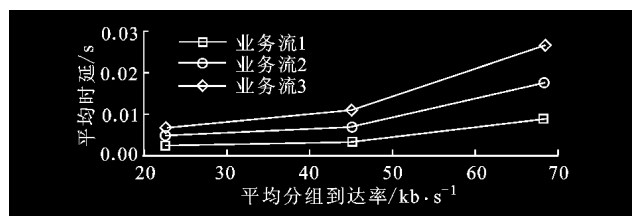


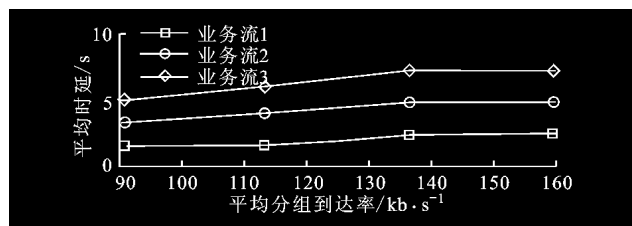
图2 性能测试的网络拓扑结构

2.1 业务流的平均分组传输时延

图 3 显示的是 3 个业务流的平均分组传输时延随平均分组到达率的变化情况. 3 个业务流的发送速率均从 23 kb/s 逐渐增加到 158 kb/s, 由于转发节点的负载逐渐增加, 所以 3 个业务流的平均时延



(a) 0.00~0.03 s 级



(b) 0~10 s 级

图3 业务流平均分组传输时延随平均分组到达率的变化

也在增加. 当流的发送速率超过 135 kb/s 时, 队列溢出, 分组的传输时延逐渐趋于恒定. 对比结果表明, 随着分组发送速率的变化, 虽然分组平均时延也在变化, 但这 3 个业务流的平均时延始终保持着给定比例.

2.2 队列的平均分组丢弃率

图 4 显示的是 3 个业务流的平均发送率从

91 kb/s 逐渐增加到 136 kb/s 时, 负责转发的节点 4 为这 3 个业务流分配的服务情况. 图 5 显示了随着图 4 所示服务的变化, 3 个业务流的平均分组丢弃率变化的情况. 由图 5 可以看出, 虽然 3 个业务流的平均分组丢弃率都在逐渐增加, 但它们的平均分组丢弃率始终严格保持着给定比例.

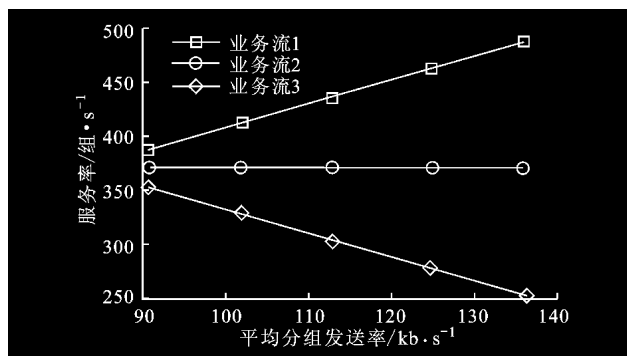


图4 队列的服务率随平均分组发送率的变化

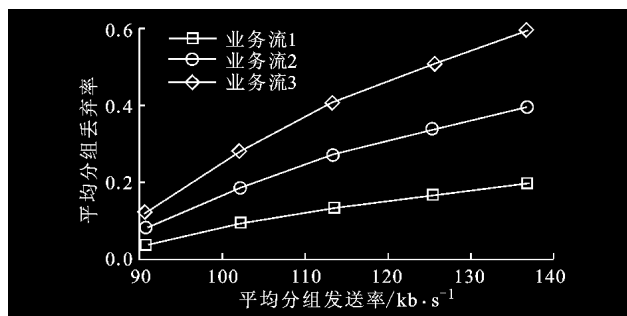


图5 队列的平均分组丢弃率随平均分组发送率的变化

3 结束语

本文提出了一种在保证比例公平原则下的 WRR 算法. 该算法以不同业务类别的平均分组到达率为依据, 通过调整不同业务类别的服务权值, 平均分组传输时延与平均分组丢弃率达到了比例公平的要求. 由于算法仅以不同业务类别的平均分组到达率作为分配服务权值的依据, 所以无需进行加时间戳及排队等复杂操作, 节省了系统的资源且易于实现, 从而更适用于 WSN 应用, 实验也证明了本文算法的有效性.

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络 [J]. 软件学报, 2003, 14 (7): 1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2003, 14 (7): 1282-1291.
- [2] 史浩山, 侯蓉辉. 无线传感器网络 QoS 机制研究 [J].

- 信息与控制, 2006, 35 (2):246-251.
- SHI Haoshan, HOU Ronghui. Study on the QoS mechanism of wireless sensor networks [J]. Information and Control, 2006, 35(2):246-251.
- [3] NICHOLS K, BLAKE S, BAKER F, et al. RFC 2474-1998 definition of the differentiated services field (DS field) in the IPv4 and IPv6 headers [S]. Reston, USA: Internet Society, 1998.
- [4] DOVROLIS C, RAMANATHAN P. Dynamic class selection: From relative differentiation to absolute QoS [C]// The 9th International Conference on Network Protocols. Piscataway, USA: IEEE, 2001:120-128.
- [5] DOVROLIS C, STILIADIS D. Proportional differentiated services: delay differentiation and packet scheduling [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10 (1):12-26.
- [6] LEUNG M K H, LUI J C S. Adaptive proportional delay differentiated services: characterization and performance evaluation [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(6):801-817.
- [7] DOVROLIS C. Proportional differentiated service, part II: loss rate differentiation and packet dropping [C]// Proceedings of International Workshop on Quality of Service. Piscataway, USA: IEEE, 2000:53-61.
- (编辑 苗凌)