

一种基于模糊神经网络的可靠流量控制模型^{*})

张 民 罗光春

(电子科技大学信息中心 成都 610054)

摘 要 为控制 P2P 流量,本文从数据缓冲区使用的实时状态出发,提出了一种基于模糊神经网络的拥塞控制模型,该模型把缓冲区划分为两个队列分别存放 P2P 和非 P2P 的数据包,通过模糊神经网络预测评估缓冲区队列的拥塞状况,并建立一个评估函数对各队列的空间分配作出指导,使得能够控制各队列的拥塞状况,并动态的调整缓冲区队列的分配,在缓冲区溢出前主动丢包,避免缓冲区锁定。模拟实验的结果表明,该模型在保证网络资源分配的公平性方面取得了较好的效果,它降低了数据包排队延时和丢包率,提高了路由器处理网络拥塞的能力。

关键词 P2P, 拥塞控制, 模糊神经网络

A Reliable New Traffic Control Model Based on Fuzzy Neural Network

ZHANG Min SHE Chun-Dong

(Information Center of University of Electronic Science and Technology of China(uestc), Chengdu 610054)

Abstract In this paper, we present a kind of congestion control model which based on fuzzy neural network(FNN) from the practical status of data buffer, for the sake of controlling P2P traffic. This model divides data buffer into two queues which store P2P data packets and non-P2P data packets respectively. It forecasts and evaluates conditions of buffer queues through FNN as well as guides space allocation of each queue through constructing a evaluation function. Thus, this model is able to control congestion condition of each queue and resize allocation of queues in the buffer automatically, then it can avoid lock-out of the buffer by actively dropping packets before the buffer is overflow. Results from simulation experiments show that this model has gained better effect in ensuring network resource allocation equitable, it can also decreases the delay of packet queuing and the dropping ratio. Thus, it improves the ability of routers in dealing with network congestion.

Keywords P2P, Congestion control, Fuzzy Neural Network (FNN)

1 引言

近几年来 P2P(Peer-To-Peer, 对等计算或对等网络)作为一项全新的 Internet 技术飞速发展。不断涌现出新型的 P2P 协议及应用软件。有关调查表明 P2P 业务已悄然占据了互联网业务总量的 60% 至 80%, 且 P2P 流量相对于其它流量具有流量大, 持续时间长的特点, 造成了网络带宽的巨大消耗, 甚至引起网络拥塞, 降低其它业务的性能。

对于 P2P 流量的管理, 在正确识别 P2P 流量的基础上, 以往的控制方法往往只是简单的采用封禁或设置带宽门限的管理模型。虽然这些模型能够达到管制 P2P 流量的目的, 但依然存在局限性:

首先, 在数据包的丢弃模型上, 常见的尾部丢弃算法尽管简单, 但由于在同一队列里对 P2P 和非 P2P 业务都以同样的方式进行转发和丢包, 使得在处理拥塞时同时也降低了非拥塞的业务的服务质量, 其性能不能令人满意。随机提前检测 RED 算法^[2,3], 对参数的依赖性非常强, 当参数配置不合理的时候性能甚至不如队尾丢弃。

其次, 以往的方法对于 P2P 流量的管制模型往往只是考虑如何对其进行限制, 没有注意到当网络资源充足时, 应放开限制, 提高网络利用率。因此, 这样的模型不能适应不断变化的网络环境, 难以满足高速网络的实时需求, 导致网络性能的

严重下降。

模糊神经网络把神经网络的低水平学习和并行计算能力与模糊逻辑系统的高水平学习和推理能力结合起来^[4]。通过将神经网络与模糊逻辑系统相结合, 不仅保持着神经网络的学习的能力, 同时拥有模糊系统知识表达及推理能力, 从而使模糊神经网络(FNN)在预测中表现出强有力的生命力^[5~15]。

本文中我们提出了一种面向 P2P 流量的基于模糊神经网络进行网络状况预测评估的拥塞控制模型(P2P-FNNC)。该模型采取分而治之的方式, 将 P2P 流与非 P2P 流划分到不同的缓冲队列中, 并启用缓冲区动态分配算法对缓冲区的分配进行优化配置。我们通过采用该模型对流量的控制, 降低路由器的丢包率, 保持较小的平均队列长度, 较低的服务延迟, 提高对网络的利用率。

2 基于 FNN 的 P2P 流量控制模型(P2P-FNNC)

针对 P2P 流量的特征对 P2P 流量进行管制, 不但需要考虑到 P2P 应用造成的网络阻塞, 同时亦需考虑到 P2P 应用对网络资源的需求。在本节的内容中将围绕着这两条逐步建立我们的 P2P 流量控制模型。

2.1 P2P-FNNC 的局部流量控制

当前的网络中, P2P 流量所占的比重越来越大。所以如果要不加以区分, 对 P2P 数据包与非 P2P 数据包都一视同仁,

^{*}) 本文受 863 课题(2005AA712025)资助; 受四川省应用基础研究基金《基于多传感器数据融合的高可靠性入侵检测技术研究》(2006J13-070)支持。

放在一个缓冲区内统一进行流量控制,那么当发生网络阻塞时,非 P2P 业务有可能比 P2P 业务更易被阻塞,使得正常的网络通信无法进行。

定义 1 设 s 为网络路由器中的缓冲区,其大小为 $Len(s)$,该缓冲区被分为两个子队列,记为 S_P2P 和 S_NP2P ,分别表示 P2P 与非 P2P 业务所占用的缓冲区队列,其长度为 $Len(S_P2P), Len(S_NP2P)$,

$$Len(S_P2P) + Len(S_NP2P) = Len(S).$$

$head_p2p, head_np2p$ 分别为两队列头指针, $tail_P2P, tail_np2p$ 为子队列尾指针

定义 2 $\dot{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t)]$ 定义为队列的实际使用状况向量,其中 $y_1(t), y_2(t)$ 为分别表示子队列 S_P2P 和 S_NP2P 的实时占用率, $y_i(t) \in [0, 1]$ 。

我们将到达路由器的数据包将其分类放入不同的子队列中,并把子队列的实时状态划分为低负荷、正常、高负荷 3 个阶段。由于各个阶段的描述本身就是一个模糊性的概念,因此,根据 Zadeh 对模糊子集的定义,我们将缓冲区子队列的占有率 $y_i(t)$ 经论域范化后映射到三个模糊子集{低负荷,正常,高负荷}或 $\{L, N, H\}$ 。根据文[1]中的模糊统计方法,确定出队列缓冲区占用率的隶属函数为钟型隶属函数

假设在 t 时刻,已知某一子队列 i 的缓冲区使用率为 $y_i(t)$,则可以推导出 $t+1$ 时刻的 $y_i(t+1)$ 的大小,若 $y_i(t+1) \in H$,则网络将发生阻塞,此时就不能将该数据放入队列中。因此预测 $y_i(t+1)$ 对于子队列的避免阻塞是一个至关重要的因素。

我们选用 5 层前向网络来实现预测,输入 $y_i(t)$ 代表当前子队列 i 的缓冲区使用情况,输出变量 $y_i(t+1)$ 为通过经过预测后的下一时刻的缓冲区使用情况,通过预测 $y_i(t+1)$ 我们可以控制缓冲区队列的拥塞状况。

在该网络中,其前提隶属函数层(第二层)的每一个神经元都具有 S(Sigmoid neuron)型活性函数作为输出,作为网络最后的输出, $y_i(t+1)$ 根据前一层的输出,通过重心法则求出的一个对队列使用拥塞的预测。考虑 $y(t)$ 为网络实际的输出, $d(t)$ 为期望的输出,其性能指标函数如下:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum [d(t) - y(t)]^2$$

网络中的各个节点以及权系数有明确的物理意义,可以根据经验设计相当好的初值。这是 FNN 比其它单纯的 NN 优点所在。我们需要学习的参数主要是最后一层的连接权 W_{ij} ,以及第二层的隶属度函数的中心值 h_i 和宽度 d_i 。学习算法部分采用 BP 算法对于学习步长 $\eta(t)$,采用变步长法。

2.2 P2P-FNNC 的全局流量控制

由于网络中不同业务在不同时间的负荷并不相同,因此若缓冲区的分配固定不变,则有可能出现某一时间段内,P2P 业务处于低谷期,其缓冲区队列始终处于低负荷状态,而对应的非 P2P 业务其缓冲区确一直处于拥塞状态,不断的丢弃数据包,造成网络延时,服务质量得不到保证。因此,有必要动态调整缓冲区的分配,使之更符合实际情况的需要。

为了能够调整缓冲区子队列的大小,我们对与缓冲区的数据结构作一些改造,把缓冲区队列设计为一个环形队列,其头尾指针分别为 Head, Tail。则相应的子队列 S_P2P 和 S_NP2P 的头指针为 $Head_p2p = Head, Head_np2p = Tail$;其尾指针分别为: $tail_p2p = Head_p2p + Len(S_P2P)$, $tail_np2p = Head_np2p - Len(S_NP2P)$ 。若需重新调整队列大小

则只需变化队列尾部的位置即可。

定义 3 $R = [r_1, r_2]$ 为缓冲区分配向量, r_i 表示分配给第 i 个子队列的空间,其中 $Len(S_P2P) = r_1, Len(S_NP2P) = r_2, r_1 + r_2 = Len(S)$ 。

考虑到网络中流量的状况是时刻变化的,我们定义一个评估函数,该评估函数评估时间间隔为 ΔT 的时间段内的网络拥塞情况。

我们设评估函数为:

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} = h(t) + k(t+1) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1(t) \\ k_2(t) \end{bmatrix}$$

该评估函数表示对长度为 ΔT 的时间间隔 $[t - \Delta T, t]$ 内的网络缓冲区拥塞状况的启发式评估,其中 $h(t) = \sum_{s=t-\Delta T}^t Y(s) / \Delta T$ 为时间间隔 $[t - \Delta T, t]$ 内队列的平均拥塞状况, $k(t+1)$ 表示对下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内网络中各队列的平均拥塞状况的预测。该函数是一个启发式的函数,它从当前各队列的拥塞状况出发,考虑了下一时段内网络的拥塞状况,最后通过函数的输出对各队列的拥塞情况作一个评估。

对于 $k(t)$,我们采用上一节建立的 FNN 进行,再训练之后,输入 $k(t)$ 即可预测 $k(t+1)$ 。根据 $k(t+1)$,我们即可调整缓冲区队列的分配。

定理 1 当 $f_1(t) \neq f_2(t)$ 时,若有 $|h_1(t) - k_1(t)| * r_1 > |h_2(t) - k_2(t)| * r_2$,则缓冲区队列的调整尺度为:

$$L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| * r_1, |h_2(t) - k_2(t)| * r_2\} \text{ 时优于其 } L = \min\{|h_1(t) - k_1(t)| * r_1, |h_2(t) - k_2(t)| * r_2\}。$$

证明:①当 $f_1(t) > f_2(t)$ 时下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内队列 1 比队列 2 需要更多的网络资源,因此应扩充队列 1 的缓冲区,相应地减小队列 2 占用的缓冲区。

缓冲区分配向量:

$$R = [r_1, r_2] = [r_1 + L, r_2 - L]$$

设在下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内到达队列 i 的平均流量为 $C_i (i=1, 2)$, (a_1, a_2) 和 (b_1, b_2) 分别表示 L 取不同值时各队列的平均占有率。

$|h_1(t) - k_1(t)| * r_1 > |h_2(t) - k_2(t)| * r_2$,若 $L = \min\{|h_1(t) - k_1(t)| * r_1, |h_2(t) - k_2(t)| * r_2\} = |h_2(t) - k_2(t)| * r_2$,则下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内各队列的平均占用率为:

$$\begin{cases} a_1 = C_1 / (r_1 + |h_2(t) - k_2(t)| * r_2) \\ a_2 = C_2 / (r_2 - |h_2(t) - k_2(t)| * r_2) \end{cases}$$

若 $L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| * r_1, |h_2(t) - k_2(t)| * r_2\} = |h_1(t) - k_1(t)| * r_1$,则下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内各队列的平均占用率为:

$$\begin{cases} b_1 = C_1 / (r_1 + |h_1(t) - k_1(t)| * r_1) \\ b_2 = C_2 / (r_2 - |h_1(t) - k_1(t)| * r_1) \end{cases}$$

此时有 $\begin{cases} h_1 > a_1 > b_1 \\ h_2 < a_2 < b_2 \end{cases}$,其中 $\begin{cases} h_1 = C_1 / r_1 \\ h_2 = C_2 / r_2 \end{cases}$ 为未调整缓冲区的状态下队列的占有率。

下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内队列 1 比队列 2 需要更多的网络资源,又 $h_1 > a_1 > b_1$,且队列 1 在下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内需避免拥塞。

队列 1 取 $L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| * r_1, |h_2(t) - k_2(t)| * r_2\}$ 时,缓冲区占有率相对较小,能更好地避免拥塞。又 $h_2 < a_2 < b_2$,且队列 2 在下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内网络负担较轻。

队列 2 取 $L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| * r_1, |h_2(t) - k_2(t)|$

$\times r_2$ 时,能够提高缓冲区的利用率,减少丢包率。当 $L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| \times r_1, |h_2(t) - k_2(t)| \times r_2\}$ 时,以 L 为尺度对缓冲区进行调整时,在下一个时间间隔 $[t, t + \Delta T]$ 内网络的全局拥塞度最轻。

②当 $f_1(t) < f_2(t)$ 时,证明同上,有相同的结论。

定理 2 当 $f_1(t) \neq f_2(t)$ 时,若有 $\{|h_1(t) - k_1(t)| \times r_1 < |h_2(t) - k_2(t)| \times r_2\}$ 时,缓冲区队列的调整尺度为

$L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| \times r_1, |h_2(t) - k_2(t)| \times r_2\}$ 时优于 $L = \min\{|h_1(t) - k_1(t)| \times r_1, |h_2(t) - k_2(t)| \times r_2\}$ 。

证明:同定理 1

综合上述分析,缓冲区队列空间分配的策略表述为:

设缓冲区队列的调整尺度为, $L = \max\{|h_1(t) - k_1(t)| \times r_1, |h_2(t) - k_2(t)| \times r_2\}$ 每隔时间间隔 ΔT 评估一次。

- 若 $f_1(t) > f_2(t)$, 则表明到第 t 时刻为止,网络缓冲区的分配已不能满足将来的需要,需重新调整缓冲区的分配,此时应加大队列 S_P2P ,减小队列 S_NP2P 。

- 若 $f_1(t) < f_2(t)$, 则表明到第 t 时刻为止,网络缓冲区的分配已不能满足将来的需要,需重新调整缓冲区的分配,此时应加大队列 S_NP2P ,减小队列 S_P2P 。

- 若 $f_1(t) = f_2(t)$, 则不改变缓冲区的分配。

3 系统仿真

3.1 实验网络架构

实验建立在 NS 仿真平台上,所使用的网络拓扑结构如图 1 所示,瓶颈链路延迟为 20ms,带宽为 1.5M,其他链路的带宽为 10M,延迟分别是 3~5ms。A1~A4 作为源端, C1~C4 是接收端。路由器上的两个队列的初始大小各为 1000 个包, TCP 连接的版本是 TCP Reno。考虑到当前实际网络中的 60% 以上的是 P2P 流,实验中将 P2P 流占的比例设为 60% 左右,并考虑其中的 10% 左右为 UDP 流,非 P2P 流量中 http 流量为主要流量,并随机的产生 ftp 应用。在 RED 算法中基本的参数的值分别设定为 $Minth = 10$, $Maxth = 30$, $wq = 0.002$, $Maxp = 0.1$ 。

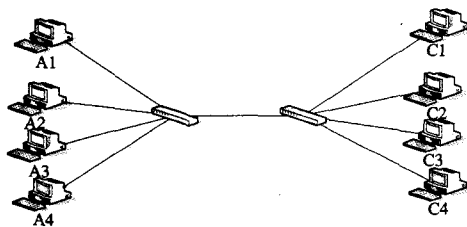


图 1 实验网络架构图

3.2 P2P-FNN 的训练和学习

本文中的 FNN 被用来预测队列的实时占用率和下一个时间间隔 ΔT 内的队列的平均占用率。通过输入采样数据,在学习训练后就可以将其用于预测评估了。下面给出预测 P2P 队列拥塞状况的网络的学习训练结果(如图 2, 3), 预测非 P2P 队列及缓冲区队列的平均占有率的网络在训练后有相似的结果。

3.3 系统性能评估

表 1 是 RED 算法和 P2P-FNNC 算法在网络拥塞下采集到的实验数据,包括总丢包数、P2P 业务丢包数、非 P2P 业务丢包数、路由器收到的数据包数,路由器正常转发的数据包数以及平均排队时间。由于将缓冲分为两个队列,因此当某一

类业务发生阻塞时,对另一业务影响大大的降低了,业务的通信质量得到了提高,同时又由于启动了缓冲区分配的全局优化,有效地避免了路由器频繁地进入强制性丢包,因而降低了总体的丢包率,提高了吞吐率。从表 2 可以看出, P2P-FNNC 算法的全局丢包率比原算法降低了约 2 个百分点,数据包的转发数比 RED 算法略有增加。同时对于不同业务的丢包率而言,非 P2P 业务的丢包率有所降低,而相应的加大了对于 P2P 业务的控制力度,其丢包率略有上升。另外由于全局缓冲区的占有率比 RED 算法更为平稳,缩短了数据包的平均排队时间,同时又将 P2P 业务与非 P2P 业务放在了不同的队列中,因而缩短了数据包的往返时间。P2P-FNNC 算法的平均排队时间减少了约 10ms。

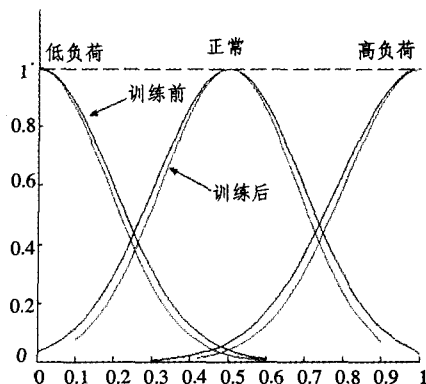


图 2 学习前后隶属函数的变化 RED 算法

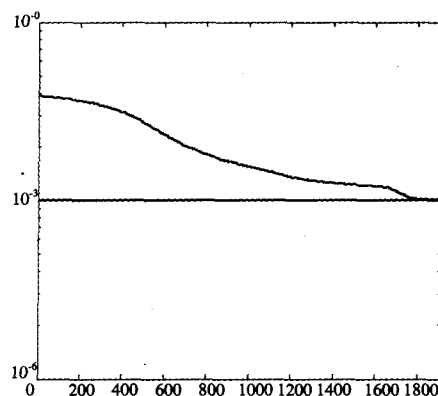


图 3 网络学习结果(误差变化)P2P-FNNC 算法

结论 本文通过模糊神经网络建立了流量控制的模型,充分利用了模糊神经网络其强大的自学习功能,通过适当的训练我们就能准确地获得流量的特征,进行正确的预测和拥塞控制。该模型从将 P2P 与非 P2P 应用数据包放置在不同的队列中,对各队列分别实施拥塞控制出发,采用了动态调整各队列缓冲区空间分配的策略,使得在保持高的吞吐率的基础上,减少了路由器的丢包,缩短了数据包的排队时间,减小了网络延时。但同时也应注意到这种算法与 RED 算法相比较,其实现相对复杂(数据包分类以及各缓冲区占用率的管理都将增加开销),但稍微增加的开销不会影响到路由器或者交换机的数据包转发性能。模型中的神经网络需在采集足够的数据之后进行离线学习,在学习完毕之后才能运用于拥塞预测,因此面对复杂多变的网络环境,何时调整网络参数,是以后的研究中需要解决的问题。

表 1 拥塞情况下丢包的对比

RED算法					
总丢包数	正常转发	到达总数	平均排队时间(s)	P2P业务丢包数	非P2P业务丢包数
2743	8676	11419	0.132755	1760	983
2947	8680	11627	0.133649	1915	1032
2832	8623	11455	0.131369	1245	1587
2866	8666	11532	0.133059	1600	1266
2910	8705	11615	0.133947	1785	1125
2977	8669	11646	0.128166	1989	989
3243	8511	11754	0.133626	1622	1621
2817	8659	11476	0.130645	1697	1120

P2P-FNNC算法					
总丢包数	正常转发	到达总数	平均排队时间(s)	P2P业务丢包数	非P2P业务丢包数
2485	8628	11113	0.122839	1760	775
2762	8693	11455	0.124617	1915	891
2606	8714	11320	0.122394	1245	1487
2600	8696	11296	0.124269	1600	1052
2663	8604	11267	0.12312	1785	987
2518	8720	11238	0.121816	1989	896
2718	8720	11438	0.119419	1622	1489
2645	8715	11360	0.122386	1697	985

表 2 拥塞情况下性能对比

算法	丢包率	P2P队列丢包率	非P2P业务丢包率	平均排队时间(s)	平均转发包
RED	25%	14.8%	10.5%	0.13261	8656.4
P2P-FNNC	23%	15.1%	9.5%	0.12236	8673.6

参考文献

- Braden B, Clark D, Crowcroft J, et al. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet. RFC 2309, 1998
- Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1993, 1(4):397~413
- Christiansen M, Jeffay K, Ott D, et al. Tuning RED for Web traffic. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2001, 9(3): 249~264
- Lin Chinteng, George L C S. Self-organizing Control Using Fuzzy Neural Network. Int J C, 1992, 56(2): 1320~1336
- Akhmetov D F, Dote Y, Ovaska S J. Fuzzy neural network with general parameter adaptation for modeling of nonlinear time-series [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2001, 12(1):148~152
- Maguire L P, Roche B, McGinnity T M, et al. Predicting a chaotic time series using a fuzzy neural network [J]. Information Sciences, 1998, 112(1-4):125~136
- Er M J, Liao J, Lin J. Fuzzy neural networks-based quality prediction system for sintering process [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(3): 314~324
- Narazaki H, Ralescu A L. An improved synthesis method for multilayered neural networks using qualitative knowledge [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 125~137
- Zhang Y Q, Kandel A. Compensatory neurofuzzy systems with fast learning algorithms [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1998, 9(1): 83~105
- Akhmetov D F, Dote Y, Ovaska S J. Fuzzy neural network with general parameter adaptation for modeling of nonlinear time-series [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2001, 12(1):148~152
- Maguire L P, Roche B, McGinnity T M, et al. Predicting a chaotic time series using a fuzzy neural network [J]. Information Sciences, 1998, 112(1-4):125~136
- Er M J, Liao J, Lin J. Fuzzy neural networks-based quality prediction system for sintering process [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(3): 314~324
- Lin C T. A neural fuzzy control system with structure and parameter learning [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 70: 183~212
- Paxson V. Fast, approximate synthesis of fractional Gaussian noise for generating self-similar network traffic [J]. ACM SIGCOMM, 1997
- Wang Z X, Hao T Z, Chen Z Q, et al. Predicting nonlinear network traffic using fuzzy neural network [A]. ICICS-PCM [C]. Singapore, 2003
- Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management: [Technical Report]. DCS-TR-441. Rutgers University, May 2001
- Santi P. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks. In: 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks, Berlin, Jan. 2004
- Heinzlman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660~670
- Younis O, Fahmy S. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach. In: Proc. 13th Joint Conf. on IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003), San Francisco, CA, Apr. 2003
- Shirazi B, Hurson A R, Kavi K M. Scheduling and Load Balancing in Parallel and Distributed Systems. IEEE CS Press, 1995
- Ye F, Zhong G, Lu S, et al. PEAS: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-Lived Sensor Networks. In: Int'l Conf. Distributed Computing Systems (ICDCS), 2003
- Blough D M, Santi P. Investigating Upper Bounds on Network Lifetime Extension for Cell-Based Energy Conservation Techniques in Stationary Ad Hoc Networks. In: Proc. ACM/IEEE Int'l Conf. Mobile Computing and Networking (MOBICOM), 2002
- Kawadia V, Kumar P R. Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks. In: Proc IEEE INFOCOM, Apr. 2003
- Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW protocol. In: Proc European Wireless 2002. Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications, Feb. 2002. 156~162
- Lee W C Y. Mobile Cellular Telecommunications. McGraw-Hill, 1995
- 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络. 90~106

(上接第 31 页)

- Collier T C, Taylor C. Self-organization in sensor networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2004, 64(7): 866~873
- Computer Science and Telecommunications Board (CSTB). Embedded Everywhere: A Research Agenda for Networked Systems of Embedded Computers. Washington, DC: National Academy Press, 2001
- Estrin D, Govindan R, Heidemann J. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Network. ACM Mobicom 99, Washington, USA, August 1999. 263~270
- Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas R S, et al. Power control in Ad Hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In: Proc. of European Wireless Conference, Florence, Italy 2002. 156~162
- Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. In: Proc. 9th Joint Conf on IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), Tel-Aviv, Israel. March 2000
- Kubisch M, Karl H, Wolisz A, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. IEEE WCNC 2003, New Orleans, Louisiana, March 2003. 16~20
- Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks. In: Proc. ACM Symp on Principles of Distributed Computing (PODC), Newport, RI, Aug. 2001. 264~273
- Li N, Hou J C, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm. In: Proc. 12th Joint Conf on IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003), San Francisco, CA. Apr. 2003
- Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions. In: Proc. 13th Joint Conf. on IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004), 2004