

改进 TCP-Illinois 算法在无线网络中的应用

陈鹏展, 于庆庆

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘 要: TCP-Illinois 拥塞控制算法适用于有线高速网络, 应用于无线网络时容易受噪声干扰导致数据丢包现象比较严重。为此, 提出一种改进的拥塞控制算法 TCP-NewIllinois, 通过瓶颈队列的积压程度判定拥塞丢包, 在拥塞发生时利用带宽估计值调整拥塞窗口和慢启动阈值, 提高无线网络带宽利用率。NS3 平台上的仿真结果表明, 与 TCP-Illinois 算法相比, TCP-NewIllinois 算法具有更高的无线网络吞吐量及传输效率。

关键词: 网络拥塞控制; TCP-Illinois 算法; 无线丢包; 带宽估计; NS3 仿真

中文引用格式: 陈鹏展, 于庆庆. 改进 TCP-Illinois 算法在无线网络中的应用[J]. 计算机工程, 2019, 45(4): 82-86, 92.

英文引用格式: CHEN Pengzhan, YU Qingqing. Application of improved TCP-Illinois algorithm in wireless network[J]. Computer Engineering, 2019, 45(4): 82-86, 92.

Application of Improved TCP-Illinois Algorithm in Wireless Network

CHEN Pengzhan, YU Qingqing

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

[Abstract] TCP-Illinois is a congestion control algorithm for wired high-speed network. When applied to wireless networks, there is a serious problem of random packet loss caused by noise interference. Therefore, an improved congestion control algorithm TCP-NewIllinois is proposed. The packet loss is determined by the backlog of bottleneck queues. When congestion occurs, the congestion window and slow start threshold are adjusted by bandwidth estimation to improve the bandwidth utilization of wireless network. Simulation results on NS3 platform show that compared with TCP-Illinois algorithm, TCP-NewIllinois algorithm has higher wireless network throughput and transmission efficiency.

[Key words] network congestion control; TCP-Illinois algorithm; wireless packet loss; bandwidth estimation; NS3 simulation

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0050342

0 概述

网络拥塞控制主要依靠网络传输层的传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)^[1]提供的一种端到端拥塞控制服务, 其核心思想是根据和式增加积式减少(Additive Increase and Multiplicative Decrease, AIMD)^[2]原则, 通过慢启动和拥塞避免等方案形成控制机制。目前, 已有多种拥塞控制算法被部署在互联网计算机操作系统的协议栈中。

随着无线网络的飞速发展, 新一代通信、传感设备基本已使用无线通信技术, 但受信道噪声干扰下的无线网络随机丢包现象较严重^[3]。TCP-Illinois^[4]是一种应用于有线网络的拥塞控制算法, 以丢包作为主信号, 队列时延作为辅助信号来避免拥塞。在未产生拥塞时, 能够更快速地增加吞吐量; 当拥塞即将到来时, 吞吐量缓慢增加, 因此拥塞窗口呈凹形曲

线, 平均吞吐量比传统 TCP 拥塞控制算法大很多。文献[4]通过建立 AIMD 算法矩阵模型验证了 TCP-Illinois 算法的公平性好、鲁棒性强。虽然该算法在有线网络中表现出良好的特性, 但应用于无线网络时会存在一些问题。由于该算法应用于有线网络, 因此认为网络中数据包的重复应答和丢失均是由网络拥塞造成, 不能准确区分无线网络的随机丢包和拥塞丢包, 容易导致在无线网络中频繁调用拥塞控制机制^[5-6], 大幅降低数据传输效率。在拥塞即将到来时, 窗口增加速度缓慢, 导致该算法在无线网络中不能充分利用中心节点的总带宽, 造成网络资源浪费, 降低网络吞吐量。本文在 TCP-Illinois 算法的基础上, 加入依据瓶颈队列的积压程度作为区分丢包类型的处理机制, 同时在拥塞发生时利用带宽估计值调整拥塞窗口和慢启动阈值^[7], 以提高无线网络的吞吐量与传输速率。

基金项目: 国家自然科学基金(61663011)。

作者简介: 陈鹏展(1975—), 男, 副教授、博士, 主研方向为无线网络、人机交互; 于庆庆, 硕士研究生。

收稿日期: 2018-01-30 **修回日期:** 2018-03-20 **E-mail:** cyxcpz@163.com

1 TCP-Illinois 拥塞控制算法

TCP-Illinois 是一种适用于高速网络的拥塞控制算法。该算法通过丢包信息确定是否需要增加或减少拥塞窗口,同时使用队列延迟信息决定所要增加或减少的窗口数量。TCP-Illinois 算法在高速有线网络中实现了较高的吞吐量,并且能公平地分配网络资源。

1.1 凹 AIMD 算法

AIMD 是网络传输层中一种解决拥塞的算法。当 TCP 发送端察觉到端到端路径没有拥塞发生时就线性增加其发送速度^[8];当检测到拥塞时就积式减小发送速度。该方法最早应用于 TCP-Reno^[9] 拥塞算法,其核心公式为:

$$\begin{cases} cwnd = cwnd + \alpha \\ cwnd = cwnd \times \beta \end{cases} \quad (1)$$

其中, $cwnd$ 是 TCP 的拥塞窗口大小, α 、 β 分别表示和式增加因子和积式减少因子。

TCP-Illinois 实现了一个凹 AIMD (Concave-AIMD) 算法,使用数据包丢失信息作为主要的拥塞信号确定窗口更新,并将队列延迟信息作为次要拥塞信号确定窗口变化数量^[10]。与标准 TCP 协议一样, TCP-Illinois 也是通过 α 、 β 决定窗口大小,但不同的是该算法中 α 、 β 不是常数,而是动态变化。 α 、 β 是关于平均队列延迟 d_a 的函数: $\alpha = f_1(d_a)$, $\beta = f_2(d_a)$, 其中, $f_1(d_a)$ 、 $f_2(d_a)$ 函数为连续分段函数,公式为:

$$\alpha = f_1(d_a) = \begin{cases} \alpha_{\max}, & d_a \leq d_1 \\ \frac{k_1}{k_2 + d_a}, & d_a > d_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\beta = f_2(d_a) = \begin{cases} \beta_{\min}, & d_a \leq d_2 \\ k_3 + k_4 d_a, & d_2 < d_a < d_3 \\ \beta_{\max}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, d_a 表示当前平均队列时延, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的计算公式为:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{(d_m - d_1) \alpha_{\min} \alpha_{\max}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \\ k_2 = \frac{(d_m - d_1) \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} - d_1 \\ k_3 = \frac{\beta_{\min} d_3 - \beta_{\max} d_2}{d_3 - d_2} \\ k_4 = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{d_3 - d_2} \end{cases} \quad (4)$$

其中, d_m 表示最大平均队列时延。

$$d_a = T_a - T_{\min} \quad (5)$$

$$d_m = T_{\max} - T_{\min} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} d_i &= (eta_i) d_m, i = 1, 2, 3, 0 \leq eta_i < 1, \\ 0 &\leq eta_2 \leq eta_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, T_a 为平均往返时延 (Round Trip Time, RTT), $T_{\min}$ 为最小 RTT, $T_{\max}$ 为最大 RTT, eta_i ($i = 1, 2, 3$) 为系数因子。为更直观地了解该算法的优化方式,给出如图 1 所示的 α 、 β 动态调整过程。

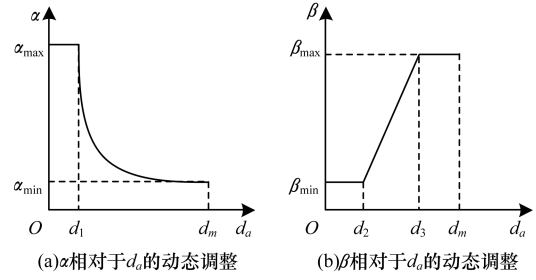


图 1 TCP-Illinois 算法中 α 、 β 相较于 d_a 的动态调整过程

当拥塞尚未发生时, TCP-Illinois 算法比传统 TCP 拥塞算法能更快地增加吞吐量。而当拥塞将要发生时,网络吞吐量会缓慢增长,因此,该方式产生的拥塞窗口类似凹形,如图 2 所示,同时平均吞吐量也要高于传统 TCP 算法。

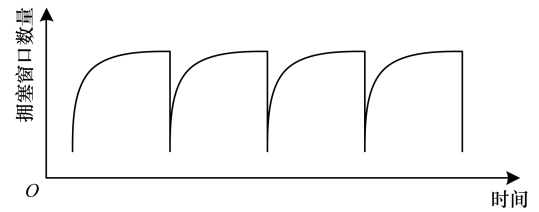


图 2 TCP-Illinois 算法拥塞窗口与时间的关系

TCP-Illinois 算法通过采集 RTT 的变化情况,不断调整拥塞窗口曲线的斜率,能够获得较高吞吐量的同时,保证了公平性。由于对 α 、 β 因子分段取值,因此提高了算法鲁棒性,并且该算法能够兼容传统 TCP 算法,方便用户切换修改。

1.2 TCP-Illinois 拥塞控制算法局限性

通过一系列的理论和仿真验证得出,该算法能够满足高速网络对拥塞控制的要求,但其在无线网络环境下的性能较差。一方面由于无线网络的信道是无形的,极易受到噪声干扰,随机丢包现象严重,而 TCP-Illinois 算法不能准确区分丢包类型,那么在其探测到拥塞时极为缓慢增加窗口的特性会导致无线网络的性能大幅下降。另一方面在无线网络中由于带宽较小,一开始传输数据就会导致 RTT 急剧增大,而 TCP-Illinois 感知到 RTT 的变化会减少窗口数量,进而降低无线网络带宽利用率及传输效率。

2 TCP-Illinois 拥塞控制算法改进

2.1 TCP-NewIllinois 拥塞控制算法基本思想

为使 TCP-Illinois 拥塞控制算法在无线网络环境下表现出较好的性能,本文采用与 TCP-Veno 算法类似的机制区分无线网络的丢包类型。在无线网络中,由于误码引起的数据包随机丢失^[11]不可忽略,这将导致传输控制协议的性能显著下降,因此该机

制利用监视网络的拥塞级别区分网络数据丢包是随机丢包还是拥塞丢包,此时判断拥塞产生的条件不再是简单地依据网络丢包的数量,而是依据网络状态以区分网络是否处于拥塞,实验表明该机制能够明显提高无线网络的吞吐量和数据传输效率^[12]。通过估计瓶颈队列的积压数量区分丢包类型,积压数量 N 的计算公式为:

$$N = \text{Actual} \times (\text{RTT} - \text{BaseRTT}) = \text{Diff} * \text{BaseRTT} \quad (8)$$

其中, Actual 表示实际发送速率, RTT 表示采样时间间隔,即往返时间, BaseRTT 表示整个过程中测量到的最小 RTT 值, Diff 的计算公式为:

$$\text{Diff} = \text{Expected} - \text{Actual} = \frac{\text{CWND}}{\text{BaseRTT}} - \frac{\text{CWND}}{\text{RTT}} \quad (9)$$

其中, CWND 表示当前拥塞窗口的大小, Expected 表示期望发送速率, Diff 表示期望发送速率与实际发送速率之差。

通过比较 N 值和预定义的阈值 θ , 区分当前网络的连接状态, 确定丢包类型, 如图 3 所示, θ 值在实验中取 3 或 6。在此基础上, 对 TCP-Illinois 算法中的拥塞避免、快速恢复等阶段进行改进, 提出一种新的拥塞控制算法 TCP-NewIllinois。

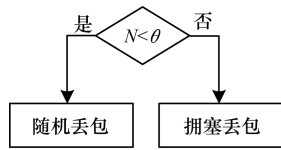


图3 丢包类型区分结果

2.2 TCP-NewIllinois 拥塞控制算法实现机制

TCP-NewIllinois 算法首先通过明确无线网络的丢包类型, 然后改进不同丢包类型下的拥塞窗口调整算法, 实现 TCP-Illinois 算法在无线网络中的应用。当判断网络处于随机丢包连接时, 由于原算法高吞吐量的特性, 因此在此状态下将保留 Concave-AIMD 算法; 当判断网络处于拥塞丢包时, 此时由于原算法中拥塞窗口呈凹形曲线的特性, 导致窗口数目增长极缓慢, 网络总带宽利用率不高, 因此本文算法将对此进行改进。

TCP-NewIllinois 算法利用网络带宽值来调整拥塞窗口, 从而最大化地利用网络带宽资源, 以此提高网络吞吐量。因此, 本文通过检测 TCP 握手协议中 ACK 每次应答的速率估计带宽值^[13], 即通过 ACK 应答的报文段数目和采样时间间隔的乘积估计带宽值, 计算公式为:

$$\text{EstimateBW} = \text{CountACK} \times \text{RTT} \quad (10)$$

其中, CountACK 表示 ACK 应答的报文段数量。由于采样过程中存在噪声干扰, 因此本文对采样数据进行平滑处理, 计算公式为:

$$\begin{aligned} \text{sampleBW} &= \text{currentBW} \\ \text{currentBW} &= (\theta \times \text{lastBW}) + (1 - \theta) \times \\ &\quad (\text{sampleBW} + \text{lastSampleBW}) / 2 \\ \text{lastSampleBW} &= \text{sampleBW} \\ \text{lastBW} &= \text{currentBW} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, sampleBW 表示本次采样带宽值, currentBW 表示本次估计带宽输出值, lastBW 表示上次带宽估计值, lastSampleBW 表示上次采样带宽值, θ 值取 0.9。

网络容量 $\text{Capacity} = \text{BDP} + \text{Queue}$, 当探测到拥塞时, EstimateBW 为此时能利用的最大带宽, $\text{Capacity} = \text{EstimateBW} \times \text{RTT}_{\max}$ 。为得到最理想的 CWND 值, 应充分利用 BDP, 同时使 Queue 为 0, $\text{ssth} = \text{EstimateBW} \times \text{RTT}_{\min}$, 通过慢启动阈值 (ssth) 调整拥塞窗口增长数目, 尽量避免网络带宽资源浪费, 这样不仅能提高无线网络吞吐量, 而且加快了网络传输效率。

TCP-NewIllinois 实现机制具体如下: 1) 判断网络拥塞窗口数目是否小于慢启动阈值, 若小于则继续保留 TCP-Reno 算法中的慢启动机制; 否则将调用改进算法。2) 若拥塞窗口数目大于 ssth , 则通过网络状态区分无线网络丢包类型是随机丢包还是拥塞丢包, 从而避免频繁调用拥塞控制机制, 提高网络传输效率。3) 当判断网络处于随机丢包连接时, 此时算法认为网络没有产生拥塞, 将依旧调用原算法中对 α 、 β 值的动态调整机制, 保证原算法中高吞吐量的特性以及良好的公平性。4) 当判断网络处于拥塞丢包时, 即认为网络将要发生拥塞。在拥塞避免阶段, 通过降低窗口的增长速度, 即每 2 个 RTT 增加一个拥塞窗口, 这样能够延长拥塞窗口始终处于较大数目的时间, 并且吞吐量也随之提高。另一方面, 通过估计网络带宽, 自适应调整慢启动阈值来控制 CWND 数目, 该方法能够最大化地利用网络带宽资源, 提高网络吞吐量。TCP-NewIllinois 算法流程如图 4 所示。

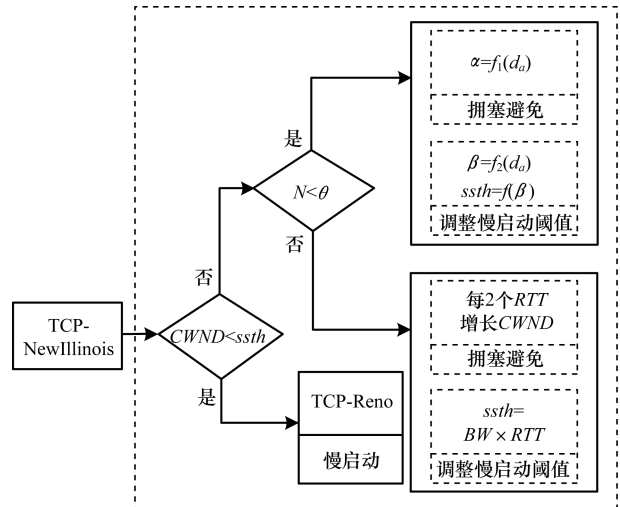


图4 TCP-NewIllinois 算法流程

3 仿真结果与分析

3.1 基于 NS3 的仿真结果

由于 NS3 网络模拟仿真器^[14] 具有较好的开发环境,模块丰富且代码开源,因此本文利用 NS3 平台验证 TCP-NewIllinois 算法的性能。无线网络的拓扑结构是典型的点对多点通信方式^[15],如图 5 所示,数字 0~8 表示无线网络中节点的序号。

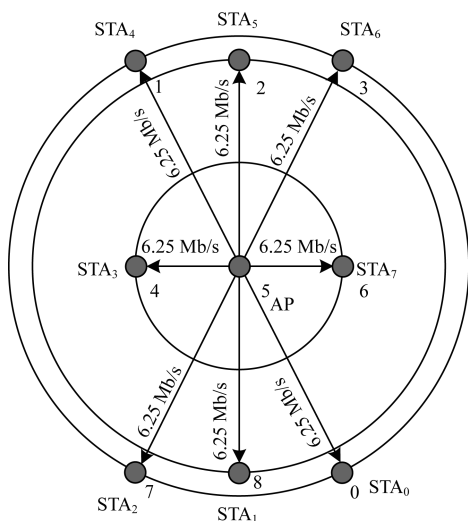


图5 无线网络拓扑基本结构

由图 5 可知,无线通信方式为点对多点模式,其中,AP 为 Wi-Fi 热点,STA_{*i*} ($i=0,1,\dots,N$) 为站点,图中站点个数可增减,同时为 STA 添加了 Wi-Fi 移动模型^[16],可在一定范围内随机移动。设置 Wi-Fi 错误模型为 YansErrorRateModel 模型,接收端噪声系数 δ 为 10 dB,其他设置采用默认模式。Wi-Fi 采用的是 IEEE802.11g 标准,热点 AP 总带宽约 54 Mb。实验中为保证两端的网络性能,始终保持所有站点 STA 的总带宽为 50 Mb。如图 5 所示,当 STA 数量为 8 时,每个 STA 的发送速率为 $50/8=6.25$ Mb/s。

3.2 无线网络性能分析

3.2.1 点对点通信性能分析

本节通过点对点无线通信实验验证算法有效性,即站点(STA)数量只有 1,此时无线网络节点之间几乎不存在干扰,如图 6 所示,2 种算法的拥塞窗口增长方式在点对点通信时有明显区别,这是因为当节点之间的干扰以及发送端速率略小于接收端速率时,TCP-Illinois 探测到即将产生拥塞时,该算法会以一个极缓慢的速度增加拥塞窗口,呈现出缓慢增长的趋势。TCP-NewIllinois 算法由于加入了无线网络丢包区分机制,当该算法检测到属于拥塞丢包时才会启动新的机制,可最大化利用无线网络的总带宽,可以看出 TCP-NewIllinois 算法在调用拥塞控制机制时,拥塞窗口的增长数量多数时间高于 TCP-Illinois 算法,因此网络传输效率更高。

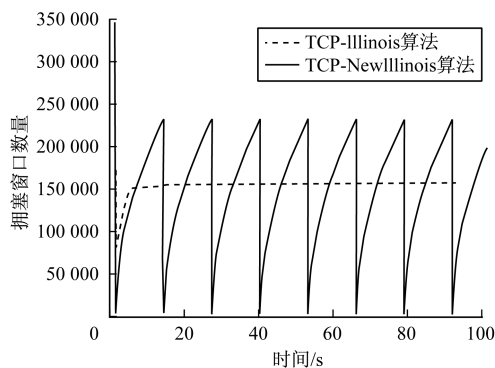


图6 点对点通信中算法拥塞窗口分析结果

从图 7 可以看出,此时 TCP-Illinois 和 TCP-NewIllinois 算法的吞吐量基本一致,但采用 TCP-NewIllinois 算法的无线网络吞吐量会较多出现瞬态峰值,这表明 TCP-NewIllinois 算法能最大化利用无线网络带宽,提高网络带宽利用率。

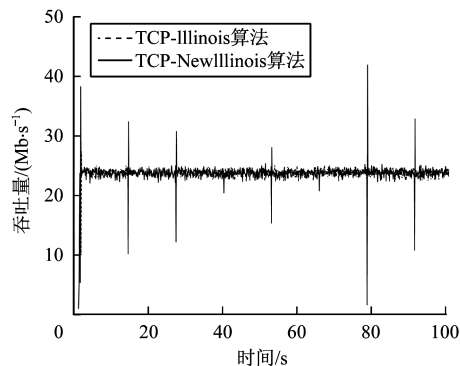


图7 点对点通信中算法吞吐量分析结果

3.2.2 点对多点通信性能分析

本节通过点对多点通信实验验证算法有效性,实验方式为不断增加 STA 数量,同时保持发送端 STA 的总带宽不变。此时无线网络中的噪声干扰加强,多个站点链路之间的竞争更激烈。另外,本文采用 TCP-Veno 拥塞控制算法进行对比实验,分析比较了 3 种算法的性能表现。

如图 8 所示,为比较 3 种算法的传输效率,仿真结果给出在不同算法下,发送端下一刻到达接收端的序列号随仿真时间的变化情况。可以看出,当站点数量为 2 时,TCP-Illinois 算法在一段时间后序列号的数量增长开始变慢,而另外 2 种算法却表现较好,造成该情况的原因是 TCP-Illinois 算法不能较好地地区分随机丢包和拥塞丢包,当网络中由无线链路干扰引起随机丢包现象发生时,TCP-Illinois 算法也认为是拥塞丢包,因此到达接收端出现相同序列号从而产生延迟,导致发送端的发送速率下降,而 TCP-NewIllinois 算法由于加入了区分机制,因此没有产生误判。当站点数量为 8 时,TCP-NewIllinois 算法会明显优于其他算法,这是因为当站点数量增多时,链路之间的竞争更加激烈,网络带宽会由于多条链路之间的竞争导致利

用率下降,所以 TCP-NewIllinois 算法在原来的基础上又加入了网络带宽的估计机制,不断检测 ACK 的到达速率估计带宽,当产生拥塞时根据估计值调整慢启动阈值和拥塞窗口,尽量避免网络带宽浪费。而另外 2 种算法基于 RTT 的拥塞避免机制未考虑如何最大化利用网络带宽。

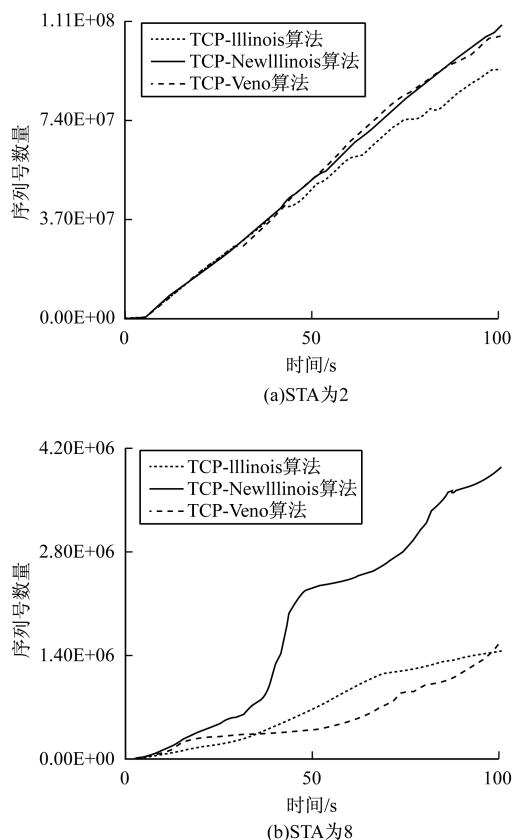


图 8 点对多点通信中算法下一刻到达接收端的序列号分析结果

图 9 为 3 种算法在站点数量逐渐增加的过程中网络平均吞吐量的变化情况,可以看出 TCP-NewIllinois 算法始终保持较高的吞吐量,通过动态调整拥塞窗口大小,在随机丢包时使拥塞窗口能够较长时间的缓慢增长。利用带宽估计机制,在产生拥塞时能最大化利用网络带宽,同时丢包区分机制避免了算法频繁调整拥塞窗口,可有效提升网络吞吐量。

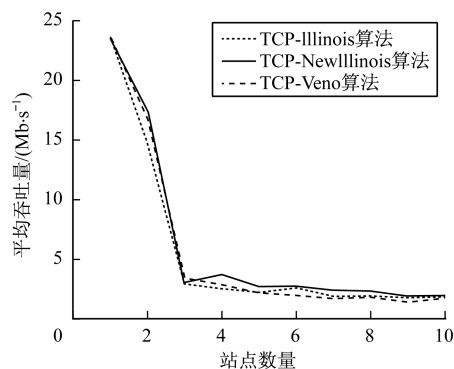


图 9 3 种算法平均吞吐量分析结果

从表 1 可以看出,STA 数量在 1 ~ 10 范围内变化时,TCP-NewIllinois 算法相比另外 2 种算法的网络吞吐量更高,且当 STA 数量为 4 和 7 时,提升效果明显,均超过 30%,仅当 STA 数量为 3 时,较 TCP-Veno 算法的网络吞吐量下降 7.3%。当 STA 数量在 1 ~ 10 范围内变化时,TCP-NewIllinois 算法相比 TCP-Illinois、TCP-Veno 算法的网络吞吐量分别平均提升约 16.3%、19.8%。

表 1 算法网络吞吐量提升结果比较

STA 数量	TCP-NewIllinois 算法较 TCP-Illinois 算法提升百分比	TCP-NewIllinois 算法较 TCP-Veno 算法提升百分比
1	0.013 5	0.280
2	16.939 0	2.375
3	8.709 0	-7.322
4	49.490 0	30.336
5	19.136 0	21.269
6	4.324 0	40.364
7	30.384 0	42.814
8	19.174 0	25.778
9	7.135 0	27.705
10	7.329 0	13.961

4 结束语

本文提出一种适用于无线网络的拥塞控制算法 TCP-NewIllinois。通过合理区分无线网络的丢包类型,有效避免频繁调整拥塞窗口,提高拥塞窗口的增长幅度。当发生拥塞时,采用带宽估计的方式动态调整拥塞窗口和慢启动阈值,提高网络的吞吐量和传输效率。实验结果验证了 TCP-NewIllinois 算法的有效性。另外,TCP-NewIllinois 算法与传统 TCP 拥塞控制算法具有较好的兼容性,可方便用户针对不同网络环境进行切换。下一步将研究接收端噪声系数对 TCP-NewIllinois 算法的性能影响,提高算法在高频次噪声干扰下的自适应能力。

参考文献

- [1] ALLMAN M, PAXSON V, STEVENS W R. TCP congestion control [EB/OL]. [2018-01-07]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc5681>.
- [2] YANG Y R, LAM S S. General AIMD congestion control[C]//Proceedings of International Conference on Network Protocols. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000:187-198.
- [3] 李牧,张勇丁,向东蕾,等.无线网络环境中传输控制协议的改进机制[J].计算机工程,2016,42(1):103-108.
- [4] LIU S,BA A R T,SRIKANT R. TCP-Illinois:A loss-and delay-based congestion control algorithm for high-speed networks [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. New York,USA:ACM Press,2006:55-58.

(下转第 92 页)

本文提出的 CSRP 协议同时考虑数据投递率和端到端延时 2 个指标,数据传输性能比其他 2 种协议好,数据投递率比 TDRP 协议高,端到端延时比 PUC-JRCA 协议短。

3 结束语

本文提出一种基于信道选择的认知无线网络路由协议 CSRP。综合考虑链路投递率和端到端延时 2 种因素,采用信道可用率和切换时延作为信道分配的标准,保证数据传输的可靠性。路径上每一跳的数据传输信道都根据本地历史信息决定,从而减少在数据传输过程中由 PU 干扰造成的信道失效次数和端到端延时,提高网络数据投递率。采用局部维护机制对已选路由进行维护,以更好地适应环境多变的多信道认知无线网络。仿真结果表明,相比于基于时延的路由协议 TDRP 和基于信道占用率的路由协议 PUC-JRCA,该协议在数据包传输时延和数据投递率方面表现更好。下一步将综合考虑信道占用率和地理位置信息,优化动态的认知无线网络路由协议的性能。

参考文献

- [1] TANG M Q, LONG C N, GUAN X P, et al. Nonconvex dynamic spectrum allocation for cognitive radio networks via particle swarm optimization and simulated annealing [J]. *Computer Networks*, 2012, 56(11): 2690-2699.
- [2] 王正强, 蒋铃鸽, 何晨, 等. 基于合作博弈的多信道认知无线网络中的频谱共享算法[J]. *通信学报*, 2014, 35(2): 70-75.
- [3] 马彬, 包小敏, 谢显中, 等. 认知无线网络中频谱切换算法研究综述[J]. *电子学报*, 2016, 44(6): 1496-1503.
- [4] CESANA M, CUOMO F, EKICI E. Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(3): 228-248.
- [5] JING T, ZHU S, LI H, et al. Cooperative relay selection in cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(5): 175-179.
- [6] 徐方, 张沪寅, 王晶, 等. 基于社会上下文认知的机会路由算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(5): 833-840.
- [7] JING L, REN P Y, XUE S L, et al. Primary-user behavior based joint routing and channel allocation algorithm in cognitive radio networks [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(11): 183-190.
- [8] CHENG G, LIU W, LI Y, et al. Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 6499-6503.
- [9] CAI Z P, DUAN Y M, BOURGEOIS A G. Delay efficient opportunistic routing in asynchronous multi-channel cognitive radio networks [J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2013, 29(4): 815-835.
- [10] 吴呈瑜, 何晨, 蒋铃鸽. 认知无线网络中的频谱切换性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(11): 2590-2595.
- [11] CHEHATA A, AJIB W, ELBIAZE H. An on-demand routing protocol for multi-hop multi-radio multi-channel cognitive radio networks [C]// *Proceedings of 2011 IFIP Wireless Days*. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [12] 李钊, 饶正发, 蔡沈锦. 协作认知无线网络中基于优先级队列的两级中心频谱共享机制[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(5): 1651-1659.
- [13] 刘婧, 任品毅, 薛少丽, 等. 认知无线网络中基于主用户行为的联合路由和信道分配算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(11): 183-190.
- [14] CACCIAPUOTI A S, CALEFFI M, PAURA L. Reactive routing for mobile cognitive radio ad hoc networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(5): 803-815.
- [15] BAYHAN S, ALAGÖZ F. A Markovian approach for best-fit channel selection in cognitive radio networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2014, 12(1): 165-177.

编辑 樊丽娜

(上接第 86 页)

- [5] SON J, LEE S. Improved wireless TCP by discriminative control using loss cause reasoning [C]// *Proceedings of International Conference on Information Networking*. Berlin, Germany: Springer, 2006: 670-679.
- [6] FLEYS D, MAHDAVI J, MATHIS M, et al. An extension to the Selective Acknowledgement (SACK) option for TCP [EB/OL]. [2018-01-07]. <https://tools.ietf.org/html/rfc2018>.
- [7] 金崇奎, 王嘉, 宋利. 一种基于 TCPW 的流媒体端到端拥塞控制方法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(10): 1959-1962.
- [8] 兰红梅. 基于生物数学模型的拥塞控制机制[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [9] PADHYE J, FIROIU V, TOWSLEY D F, et al. Modeling TCP Reno performance: a simple model and its empirical validation [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2000, 8(2): 133-145.
- [10] 江先亮. 面向网络加速的传输控制优化若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [11] SINHA P. WTCP: a reliable transport protocol for wireless widearea networks [J]. *Wireless Networks*, 2002, 8(2): 301-316.
- [12] CHENG P F, LIEW S C. TCP Veno: TCP enhancement for transmission over wireless access networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 216-228.
- [13] XU K, TIAN Y, ANSARI N. TCP-jersey for wireless IP communications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(4): 747-756.
- [14] 茹新宇, 刘渊, 陈伟. 新网络仿真器 NS3 的研究综述[J]. *微型机与应用*, 2017, 36(20): 14-16.
- [15] 张江贵. 井下 Mesh 救灾网络语音通信子系统设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [16] 崔翠梅, 杨德智, 姜程鑫. 基于 NS3 的移动认知网络仿真系统[J]. *通信技术*, 2016, 49(11): 1509-1513.

编辑 陆燕菲