REM 算法的改进

Improvement of the REM Algorithm

陈元琰[1]，**闫友彪**[1]，**罗晓曙**[2]

Chen Yuanyan[1], Yan Youbiao[1], Luo Xiaoshu[2]

(1. 广西师范大学数学与计算机科学学院，广西桂林 541004；2. 广西师范大学物理与信息工程学院，广西桂林 541004)

(1. Coll. of Math. and Comp. Sci., Guangxi Normal Univ., Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. Coll. of Phy. and Info. Engi., Guangxi Normal Univ., Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要：在分析REM算法和最优化流控模型的基础上，改用非线性优化理论的变尺度算法计算链路影子价格，从而改进了REM算法. 模拟实验表明，改进后的REM算法队列十分平稳，收敛速度比原来的算法快，适用于高带宽网络.

关键词：REM算法 最优化流控 拥塞控制 Internet

中图法分类号：TP393.07 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-7378(2005)04-0212-03

Abstract: The DFP method of non-linear optimization is used to calculate shadow price in link. The REM algorithm is improved on the basis of analysis of REM algorithm and optimization flow control model. The simulation experiments showed that the improved REM algorithm had stable queue and was faster convergent than REM.

Key words: REM algorithm, optimization flow control, congestion control, Internet

随着计算机网络和通信技术的发展，现有的拥塞控制协议已经远远无法满足当前与未来的需要. 很长一段时间内，作用于端系统上的基于窗口的TCP隐式定性反馈机制一直是Internet网络拥塞控制的主导技术，但近来的研究表明，无论采用如何精妙的机制，端系统在流量控制中所能发挥的作用终究是有限的. 显式拥塞指示(Explicit Congestion Notification，简称ECN)[1]显著地提高了连接的有效吞吐量. 但是ECN的拥塞反馈信息只有一位，因而仍然是定性的、不精确的.

鉴于拥塞控制研究巨大的复杂性，国外在拥塞控制研究方面基本上已转向严格的数学上的动力学分析，借助于非线性动力学与优化方法和控制理论来分析现有拥塞控制算法的稳定性与公平性等性能，取得了许多重要的进展. S. H. Low 等[2,3]基于优化理论和 F. P. Kelly 等[4]提出的用"价格"或"影子价格"来表示网络拥塞度量，提出了完整的TCP/AQM对偶性模型.

随机指数标记(Random Exponential Marking，简称REM)是S. Athuraliya 和S. H. Low 等[5]在最优化流控模型的基础上，利用了 F. P. Kelly 提出的网络流量优化理论中"价格"[4]的概念来探测和控制网络的拥塞状态，为流量控制开辟了一个新的领城. 因为REM算法是梯度寻优的解，虽然能实现AQM的技术目标，但目前的性能还不甚理想.

本文在 S. H. Low 等[5]提出的最优化流控模型和REM算法的基础上，采用非线性优化理论中的变尺度算法来计算链路影子价格，提出一种改进的REM算法，模拟实验表明，改进后的REM算法队列十分平稳，收敛速度比原来的算法快.

1 最优化流控模型

1999年S. H. Low 等[2]基于优化理论提出了最优化流控模型. 在该模型中，源端发送速率和路由器拥塞度量相互影响，源端根据反馈回来的精确拥塞度量(在该模型中称为"价格")调整其发送速率，而各源端发送速率的大小又会反过来影响拥塞度量，从而构成一个闭环拥塞控制系统. 对偶性模型的主导思想是把发送速率看作原始变量，把拥塞度量看作对偶变量，而现有的TCP/AQM算法则可看作是使总的资源利用率最大的Lagrangian方法，这是

收稿日期：2005-06-27

作者简介：陈元琰(1961-)，男，福建仙游人，副教授，主要从事计算机图形学和计算机网络学研究。

优化理论中的一个基本方法.

最优化流控模型的对偶问题的目标函数为[2]:

$$D(p) = \sum_s B_s(p^s) + \sum_l p_l c_l,$$

其中,$B_s(p^s) = \max\limits_{x_s \in I_s} \sum_s U_s(x_s) - x_s p^s, p^s = \sum\limits_{l \in L(s)} p_l,$

$$\tag{1}$$

因此对偶问题即为 $D: \min\limits_{p \geqslant 0} D(p)$. (2)

可以看出,对偶问题的目标函数 $D(p)$ 的第一部分是可以分隔成(1)式所表示的 s 个子问题. 如果将 p_l 解释为链路 l 的每单位带宽的价格,则 p^s 就是源 s 所经过的所有链路的总的单位带宽价格,因此,$x_s p^s$ 就表示为源 s 在它的传输速率为 x_s 时的总带宽使用成本,$B_s(p^s)$ 就表示为当链路给定的价格为 p^s 时源 s 可达到的最大利益,亦即当给定价格为 p^s 时源 s 可以独立求解它的最大速率. 这里,p^s 概括了源 s 需要知道的所有拥塞信息. 一个源端 s 通过带宽计费可被用来求解(1)式的最大化.

根据非线性优化理论中 Kuhn-Tucker 定理,$x_s(p)$ 可以通过下式求出:

$$x_s(p) = \left[U'^{-1}_s(p)\right]_{m_s}^{M_s} \tag{3}$$

其中,U'^{-1}_s 是 U'_s 的逆,其存在范围为$[U'_s(M_s), U'_s(m_s)]$,因为 U'_s 是连续的,U_s 是严格凹的.

2 链路影子价格的计算

S. H. Low 等[3] 采用梯度算法来求解对偶问题,可得链路 $l \in L$ 的价格调整规则为:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) + \gamma(y_l(t) - c_l)]^+, \tag{4}$$

其中,$y_l(t) = x^l(p(t)) = \sum_{s \in S(l)} x_s(p(t))$ 是所有源端 s 在某时刻 t 经过链路 l 的源速率之和;$\gamma > 0$ 表示步长;$[z]^+$ 记号表示$[z]^+ = \max\{x, 0\}$.

可以证明上面的算法收敛,但是梯度寻优算法收敛速度太慢,牛顿方法需要计算 Hessian 逆矩阵,而且需要每个链路知道其它的链路的信息,因此本文采用变尺度法的求解适合于高带宽链路的算法.

本文采用 1959 年由 Davidon 提出的后经 Fletcher 和 Powell 改进的一类变尺度算法——DFP 算法[6] 计算 $h(t)$,其迭代公式由下式给出:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) - \gamma h(t) \nabla D(p(t))]^+, h(t) = h(t-1) + \frac{\Psi^l (\Psi^l)^T}{(\Psi^l)^T \zeta^l} - \frac{h(t-1)\zeta^l (\zeta^l)^T h(t-1)}{(\zeta^l)^T h(t-1) \zeta^l},$$

其中,$\Psi^l = p(t) - p(t-1)$,$\zeta^l = \nabla D(p(t)) - \nabla D(p(t-1))$.

如果求解的目标是单个链路(一维的情况),则 $h(t)$ 公式可以简化,并将用 $\nabla D(p(t)) = c_l - y_l(p(t))$[3] 代入,可得到简洁的式子:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) - \gamma(\frac{p_l(t) - p_l(t-1)}{y_l(t) - y_l(t-1)})(y_l(t) - c_l)]^+, \tag{5}$$

若变换上式为:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) + \gamma(\frac{c_l - y_l(t)}{y_l(t) - y_l(t-1)})(p_l(t) - p_l(t-1))]^+, \tag{6}$$

则(6)式中的分式表示链路剩余的带宽容量与源端上次增加速率的比例,这个比例值大则促使源端更快的增加发送速率,这样的调整显然更加适用于高带宽远距离网络,使网络最快的达到最大利用率.

将(5)式中的分式及 γ 前面的"—"看作修正因子,可将(5)式变为:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) + \gamma \varphi_l(t)(y_l(t) - c_l)]^+,$$

$$\varphi_l(t) = \max(\varepsilon, -\frac{p_l(t) - p_l(t-1)}{y_l(t) - y_l(t-1)}), \tag{7}$$

$\varepsilon > 0$ 是为了防止(7)式中的修正因子 $\varphi_l(t)$ 小于等于 0. 可以看出这个算法与梯度算法(4)一样,价格的调整方向只与链路带宽的利用状况相关,不同的是加上了修正因子,而且还利用了速率与价格的历史信息,这与现实网络的相似特性一致. 该变尺度算法具有二次终结性,同时既具有共轭梯度法的特征,也有牛顿算法的特征.

3 REM 算法的改进

REM 算法属于主动队列管理(AQM)算法之一,它是一种基于流检测的拥塞控制算法,并非通过延时或丢包等指示,而是通过由分布在链路上的局部信息(包标记信息)计算得到的带宽价格,检测拥塞,进而发送端相应的调整其发送速率.

REM 是个典型的基于隐式价格的拥塞控制协议,它与直接价格反馈的算法不同,基于隐式价格的算法需要将价格转换为丢弃或者标记概率,源端需要估计此概率进而重构出中间节点的总价格,并依此估算出的价格来调整其发送速率.

REM 的链路算法是在梯度算法(4)的基础上加上排队延迟因素修改而成的:

$$p_l(t+1) = [p_l(t) + \gamma(\beta_l b_l(t) + y_l(t) - c_l)]^+, \tag{8}$$

其中,$b_l(t)$ 是时刻 t 的队列长度;$\beta_l > 0$ 是个很小的常数;与(4)式相比这一项就是考虑到链路中的排队时延因素影响. 此时在链路 l 包的标记概率是 $m_l(t) = 1 - \delta^{-p_l(t)}$($\delta$ 是常数且 $\delta > 1$),则源 s 的端

到端的总的标记概率是 $m^s(t) = 1 - \prod_{l\in L(s)}(1 - m_l(t)) = 1 - \delta^{-p^s(t)}$.

源端 s 算法为:源 s 计算 $m^s(t)$,接着估计所使用的链路路径的价格 $p^s(t)$ 为 $p^s(t) = -\log_\delta(1 - m^s(t))$,则源端 s 按照如下规则调整其发送速率:$x_s(t+1) = [U_s'^{-1}(p^s(t))]_{m_s}^{M_s}$.

根据上面对计算链路影子价格所采用的变尺度算法的(7)式,同时也考虑网络传输时延(用 τ 表示 RTT)的影响,本文将REM的原链路算法(8)式修改为

$$p_l(t+1) = [p_l(t) + \gamma\varphi_l(t)(\beta_l \frac{b_l(t)}{\tau} + y_l(t) - c_l)]^+, \varphi_l(t) = \max(\varepsilon, -\frac{p_l(t) - p_l(t-1)}{y_l(t) - y_l(t-1)}). \quad (9)$$

从上面的分析可知,该算法具有更快的收敛速率,且适用于高带宽网络,使之更快的响应网络.

4 模拟实验

本文采用NS2模拟软件对改进后的REM算法进行性能比较分析.算法中参数设置为 $\gamma = 0.4$,$\beta = 0.565$,$\varepsilon = 0.001$,模拟时间为25s.图1为网络拓扑结构.

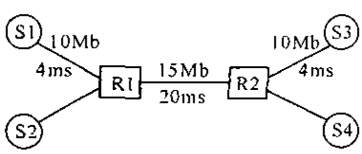

图1 网络拓扑结构

图1中S1、S2、S3和S4为4个源端,产生FTP数据流,R1、R2均为REM路由器,R1、R2之间为瓶颈链路,其带宽和延迟为15Mb/s、20ms,网络中其它链路带宽和延迟设为10Mb/s、4ms,在本文的初步模拟实验中,所有数据包的长度设为1000 bytes,TCP Clock以0.01ms为单位计时,图2分别是原始REM算法队列图,图3是改进后的REM算法的队列图。

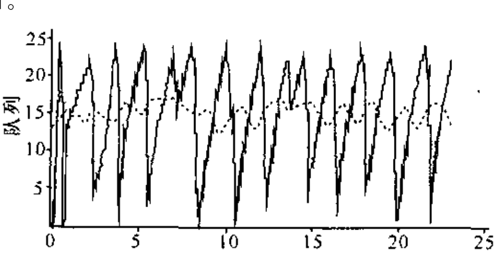

图2 REM的瞬时队列和平均队列

——:瞬时队列;……:平均队列

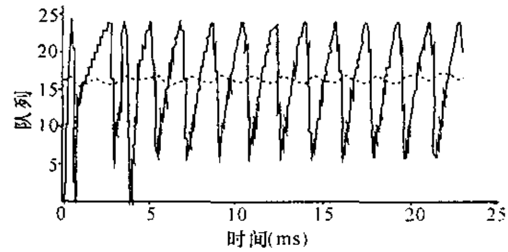

图3 改进后的REM算法队列

——:瞬时队列;……:平均队列

从图3可以看出,改进后的算法队列十分平稳,显然它的收敛速度比原来的算法更快,这与理论上的结论一致。

5 结束语

本文在S. H. Low等人[5]提出的最优化流控模型和REM算法的基础上,采用非线性优化理论中的变尺度算法来计算链路影子价格,提出了一种改进的REM算法。模拟实验证明,改进后的REM算法队列十分平稳,很显然它的收敛速度比原来的算法更快,这个结果与理论上的结论一致。

参考文献:

[1] 陶小梅,罗晓曙,陈元琰,等. IP网络中的显式拥塞指示研究[J]. 计算机应用研究,2005,22(1):55-58.

[2] Low S H,David E. Lapsley,Optimization flow control I:basic algorithm and convergence[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,1999,7(6):861-874.

[3] Low S H. A duality model of TCP and queue management algorithms [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2003,11(4):525-536.

[4] Kelly F P,Maulloo A,Tan D. Rate control for communication networks:Shadow prices,proportional fairness and stability[J]. J of Operations Research Society,1998,49(3):237-252.

[5] Athuraliya S,Li V H,Low S H,et al. REM:active queue management[J]. IEEE Network,2001,15(3):48-53.

[6] 施光燕,董加礼. 最优化方法[M]. 北京:高等教育出版社. 1999.

(责任编辑:黎贞崇)