

# 随机早期侦测队列控制测度自适应性模型研究<sup>①</sup>

## Research on the Adaptability Model of RED Queue's Control Measurements

邬平 吴斌 (云南省科学技术情报研究院 云南 昆明 650051)

**摘要:** 提出一种确定 RED 控制测度与网络性能耦合关系的方法。通过限定范围内调变多维控制测度的重复场景仿真方法,获得 RED 队列模型控制测度对同构网络的影响曲线,甄选线性代数数学模型建模,得到 RED 控制测度对网络性能自适应的控制模型,为改善 RED 与网络紧耦合关系提供理论依据。

**关键词:** RED 仿真场景 控制测度 系统辨识 自适应性 耦合

### 1 引言

随机早期侦测算法<sup>[1]</sup> (RED: Random Early Detect) 的设计思路是在平均队列长度和网络拥塞程度之间建立分段函数,通过概率控制队列数据的丢弃行为,将平均队列长期稳定于一定范围,最终达到拥塞控制的目的。

美国计算机科学家 Sally Floyd 等人发现单纯的队列长度范围控制手段在网络负载小时,算法能较好的进行控制,网络负载大,则容易发生 TCP 全局同步、队列抖动剧烈、队列节点吞吐量下降,传输延迟加大。此外,RED 存在网络拥塞控制性能随变动的参数设置的非线性<sup>[2]</sup>,TCP 流占用带宽资源非公平性以及控制范围有限性等缺陷。为解决这些问题,以 RED 算法为原型出现了 ARED、FRED<sup>[3]</sup>、SRED<sup>[4]</sup>和 WRED 算法,分别从控制参数自适应性、公平性和有效控制范围的角度改进 RED 算法。

RED 算法为平均队列长度设置上下阈值的思路使各种 RED 算法都存在自身参数设置的问题,若自身参数设置不当,不仅使拥塞控制算法失效,还明显降低网络性能<sup>[5]</sup>。虽然 ARED 提出了阈值控制参数及丢弃概率的函数关系,但是没有确切计算出算法控制的可用参数分布范围,拥塞控制仍凭人为经验判定,应用局限性大。鉴于 RED 应用障碍,本文将根据不同 RED 参数设置设计网络仿真实验,以期在拥塞可控范围内拟合分布曲线推导出丢弃概率测度与控制参数间函数自适应函数关系。

### 2 RED 仿真实验设计

#### 2.1 仿真网络场景设计

为测定控制参数对队列利用率、平均队列长度及吞吐量等衡量网络性能的指标影响,因此在模拟期间内,要求数据源均匀发送数据包、流经节点队列的 TCP 流保持数量不变、网络链路中数据包尺寸大小一致、RTT 为常值。此外,在时隙内流经节点平均数据包尺寸总数量应大于节点网络资源的容量,出现拥塞现象,才能使 RED 算法进行拥塞控制,从而获取有效测试数据。

根据所述要求,仿真网络拓扑参数如表 1:

表 1 仿真网络拓扑参数表

仿真对象	参数	说明
网关节点	\$ n2	网关节点对象
目标节点	\$ n3	目标节点对象
源节点	\$ s( \$ i), i=2	2 个源节点对象
网络协议	Tcp	TCP 协议
应用协议	ftp	文件传输协议
源节点链路	duplex 10mb 1ms 50queueulimit drop - tail	链路类型为全双、10M 带宽、1ms 传输延迟、50 队列尺寸、队列管理方式:截尾丢弃

① 基金项目:云南省科院所技术开发研究专项资金(2006KFZX-19)

续表

网关节点链路	duplex 0.7mb 20ms RED	链路类型为全双、0.7M 带宽、20ms 传输延迟、队列管理方式: RED
仿真时间	20s	场景仿真时间 20 秒
源节点数据流	50	每个节点并发 50 个数据流
数据分包尺寸	552bytes	Tcp 数据分包大小为 512b

拥塞现象是传输数据耗尽可用带宽资源<sup>[6]</sup>, 根据这一表述, 构造拥塞发生公式条件 1:

$$\int_0^t \frac{aPkg(t) - dPkg(t)}{pkgSize} dt > QLen \quad (1)$$

说明: [0 - t] 为仿真时长, pkgSize 为网络链路数据分包尺寸, aPkg(t) 为瞬时到达的数据量, dPkg(t) 为瞬时离开的数据量, QLen 是队列长度。物理意义为整个仿真期间所到达数据包与离去数据包相减, 若数量大于队列长度, 必然发生数据包丢弃现象, 网络出现拥塞。

根据表 1, 数据源为 2 两发送节点, 每节点同时并发 50 个数据流, 网关节点在仿真期间流经数据流为 100。发送源到网关节点的链路容量  $10 \times 2 = 20\text{Mb}$ , 数据分包大小 592 字节 (552 字节数据段 + 40 字节数据头), 则得到拥塞发生公式 2:

$$\frac{\int aPkg(t)dt - \int dPkg(t)dt}{pkgSize + hdr} \times (t - 0) \Rightarrow \frac{bBw - nBw}{pkgSize + hdr} \times t \quad (2)$$

$bB_w$  为宽带链路传输容量,  $nBw$  为窄带链路传输容量,  $hdr$  为数据头。根据公式 2, 计算  $20 \times (20 - 0.7) \times 1000 / (592 \times 8) = 81$ , 其长度大于仿真场景队列长度 50, 在仿真期间必定能发生网络拥塞, 仿真网络拓扑参数符合实验要求。

### 2.2 RED 队列性能指标计算方法

RED 队列性能主要参考指标: 网络链路利用率、平均队列长度以及数据包丢弃率三个测试量子。网络链路利用率测试量子是节点吞吐量能力测度, 平均队列长度测试量子是队列延迟测度, 而数据包丢弃率则是数据传输可靠性测度。

节点吞吐量  $thp$  是在粒度时间内到达队列的数据量, 设时间粒度为  $g$  (粒度: granularity), 平均每秒到达数据量为  $\Delta m$ , 在仿真时间长度  $t$  内数据吞吐量计算如公式 3:

$$thp = \frac{\sum \Delta m \times g_i}{t}, i = 0, 1, 2, \dots, (t/g) \quad (3)$$

队列延迟时间通过平均队列长  $QLen (avg)$ 、数据包大小  $PkgSize$ 、窄带链路带宽  $nBw$  进行计算:

$$Dq = \frac{QLen(avg) \times PkgSize \times 8}{nBw \times 10^3} \quad (4)$$

网络链路利用率即仿真期间队列平均长度:  $QLen (avg)$ 。

根据测试量子的计算公式, 仿真场景应采集到每一时间段达数据队列数据量、测试时间范围内平均队列长度、控制测度的实验分量值。

### 2.3 实验方法及测试范围

整个仿真实验是基于 NS-2<sup>[7]</sup> 网络仿真器进行设计开发, 对仿真环境中通过网关节点的数据数量、数据类型和数据尺寸大小进行统计追踪保存。每次测试产生的平均队列、吞吐量及控制测度作为一个空间样本值, 通过数据采集模块获取空间样本, 在数据分析模块中汇总结果。

重复性场景测试采用单步累加控制测度方式。为得到  $Wq$ 、 $thres$ 、 $maxthres$  和  $linterm$  四维控制测度对同构仿真场景的影响, 我们选择  $Wq$  取值范围 [0.0001 ~ 1]<sup>[8]</sup>、 $linterm$  取值范围 [1 ~ 100] ( $linterm$  是队列队列丢弃概率值的反除数, 即最大丢弃概率  $max\_p = 1/linterm$ )、 $thresh$  和  $maxthresh$  取值范围 [1 ~ 50], 并且  $thresh < maxthresh$ 。

## 3 数据采集及分析

### 3.1 $Wq$ 控制测度分析

$Wq$  初始值 0.0001, 单步仿真 20 秒, 控制测度增量 0.0001, 队列最大丢弃概率  $max\_p$  为 10%, 共 1000 次实验得吞吐量曲线图 1 和平均队列利用率曲线图 2。

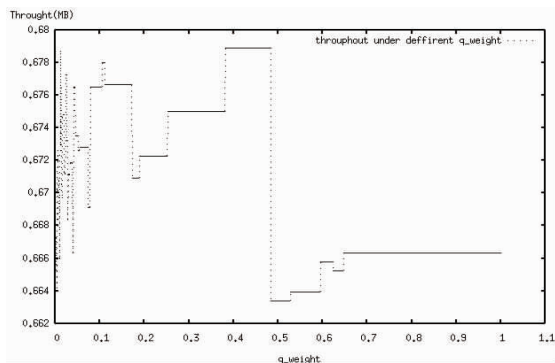


图 1  $Wq$  控制测度吞吐量影响曲线图

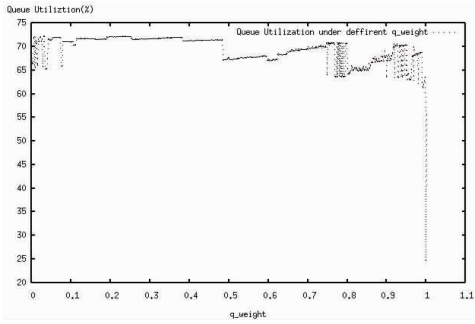


图 2 Wq 控制测度队列利用率影响曲线图

图1、图2显示,Wq 取值[0 ~0.25]范围时,同构场景仿真实验的吞吐量及队列利用率出现剧烈的起伏波动,Wq 控制测度不能体现对网络性能的影响效果,线性特性不明显,无法采用数学手段进行分析。[0.25 ~0.6]范围出现一次明显升降,其升降位置为 0.48。Wq 控制测度在此范围内进行分段函数的线性拟合。

### 3.2 Linterm 控制测度分析

在高吞吐量状态下,变动数据包最大丢弃概率能明显看出 linterm 控制测度对网络性能的影响,因此 Wq 初始值 0.48。单步仿真 20 秒,最大丢弃概率初始值 1,linterm 控制测度增量 1/n,共 100 次实验得吞吐量曲线图 3 和平均队列利用率曲线图 4。

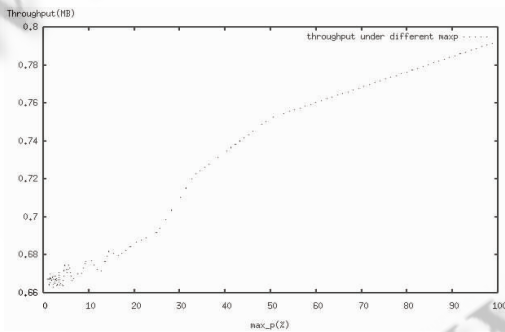


图 3 linterm 控制测度吞吐量影响曲线图

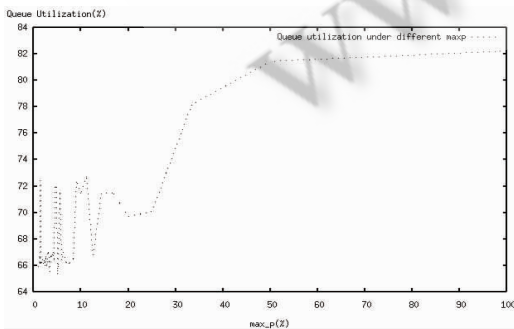


图 4 linterm 控制测度队列利用率影响曲线图

图 3 和图 4 显示不同最大丢弃概率 max\_p 下网络吞吐量及队列利用率的曲线图。其中,网络吞吐量随 max\_p 增加而线性增加,说明高吞吐量性能的获得是通过牺牲数据丢弃率而获得。当链路吞吐量较大,max\_p 较低,实验得到队列利用率比较低,在 [0 - 20%] 队列利用率 68%,队列延迟较小;随着 max\_p 增高,数据丢弃率增高,同时增加节点吞吐量。max\_p 控制测度与网络性能曲线呈现积分特点。

### 3.3 Thresh 及 maxThresh 控制测度分析

从前面分析可知,当 Wq 初始值 0.48,max\_p 为 0.2,得到较高的吞吐量和较低的数据延迟,因此 RED 阈值测度 thresh 及 maxthresh 以此为基线,分别进行 50 次实验得吞吐量曲线图 5 和平均队列利用率曲线图 6。

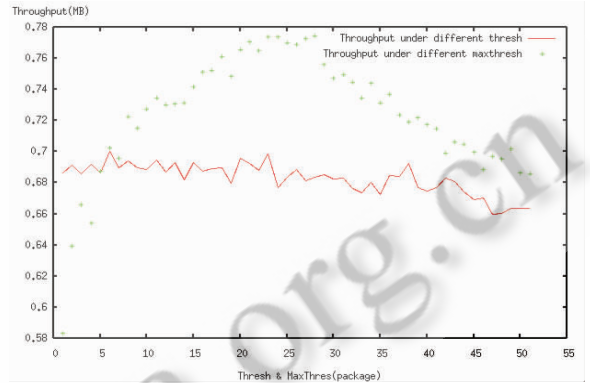


图 5 thresh 及 maxthresh 控制测度吞吐量影响曲线图

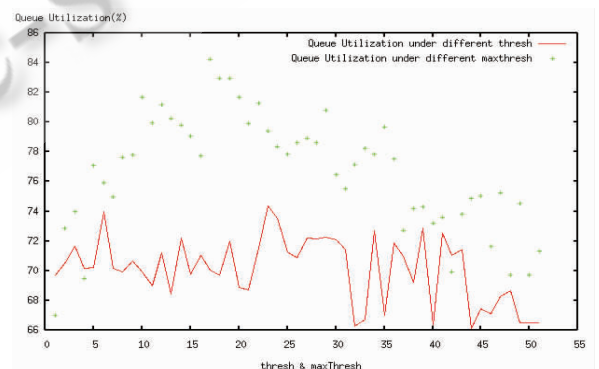


图 6 thresh,maxthresh 控制测度队列利用影响曲线图

图 5、图 6 中实线部分是固定 maxthresh 值,通过 50 次仿真场景测试获得曲线,thresh 在测试范围内,对吞吐量影响不明显,队列利用率平均稳定于 70% 附近,队列传输延迟稳定于常值,因此 thresh 控制测度与

网络性能独立不相关。

曲线图绘点部分为固定 **thresh** 值, 调变 **maxthresh** 值产生的吞吐量及队列利用率分布图。当 **maxthresh** 达到 25 时, 获得最大吞吐量 0.78Mb, 这一数值使窄带链路满载而发生网络拥塞, 同时网络队列利用率达到最高 86%。整个结果曲线形状的绘制路径与正态分布模型相融, 具有正态分布特性的 **maxthresh** 控制测度必成为影响网络性能的衡量因素之一。

## 4 模型系统辨识

### 4.1 模型分析

从数据采集结果分析得知, RED 主要的控制测度 **Wq**、**max\_p**、**thresh** 及 **maxthresh** 对吞吐量及网络延迟两性能指标呈现不同的函数关系特性。

(1) **Wq** 在其他控制测度定值条件下, 属于阶梯分段函数, 其从 [0.2 - 0.5] 范围内单调递增, 0.5 之后网络性能急剧下降。设 **thp** 为网络吞吐量, **dly** 为延迟时间, 采用矩阵模型<sup>[9]</sup>, 得到 **Wq** 与 **thp**、**dly** 关系如式 5:

$$\begin{bmatrix} thp \\ dly \end{bmatrix} = \kappa [wq(i)] \cdot [I] \quad (5)$$

[**wq**(i)] 是 **Wq** 控制测度的数值分布矩阵, [I] 为 0-1 分布的单位矩阵, 鉴别分段函数中各阶 **wq**(i) 表示的吞吐量性能; **k** 为增量因子, 即控制测度范围内网络性能数值, 由其他控制测度确定其数值。

$$\text{设 } P = \begin{bmatrix} thp \\ dly \end{bmatrix} [wq(i)] = WQ, \text{ 得 } P = \kappa \cdot WQ \cdot I \quad (6)$$

(2) 在其他控制测度定值条件下, 随 **max\_p** 增加, 网络性能参量呈单调递增, 并最终趋于常值, 例如吞吐量 **thp** 大小最终将等于窄带链路带宽容量 **nBw**, 采用积分模型可以有效表示这一变化路径。根据积分模型<sup>[10]</sup>, 得到关系式 7:

$$p = E \times \left( 1 - e^{-\frac{\max\_p}{\lambda}} \right) \quad (7)$$

**P** 为网络吞吐量、队列延迟的示性参量, **E** 是网络性能极值, 若性能参量是吞吐量, 则 **E** 为窄带链路带宽 **nBw**, **λ** 为性能变化频率, 由其他控制测度确定。

(3) 通过仿真实验发现 **thresh** 与网络性能参量的不相干性, **maxthresh** 呈现正态分布特性<sup>[11]</sup>, 得到关于 **maxthresh** 控制测度关系式 8:

$$p = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\max\_thresh - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$  表示网络性能参量的幅值, **μ** 是正态分布

中心值, 当 **maxthresh** 取值为 **μ**, 网络性能参量值达到最大。

### 4.2 逻辑综合

式 7、8 中 **E** 与  $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$  均为网络性能参量指标, 量

纲相同, 可以做等价消去处理, 即式 7 中网络性能极值 **E** 与式 8 中网络性能参量幅值进行量纲消元。为直观反映控制测度网络性能参量的影响因子, 量纲消元比值为 1。通过函数代入法, 解二元方程, 得到式 9:

$$e^{-\left(\frac{\max\_thresh - \mu}{E\sqrt{2\pi}}\right)^2} + e^{-\frac{\max\_p}{\lambda}} = 1 \quad (9)$$

根据三角函数与指数函数公式<sup>[12]</sup>解得:

$$\lambda = -\frac{\max\_p}{\left(\frac{\max\_thresh - \mu}{E\sqrt{2\pi}}\right)^2} \quad (10)$$

$$p = E \times \left( 1 - e^{-\frac{2\pi E^2 \max\_p}{(\max\_thresh - \mu)^2}} \right) \quad (11)$$

**P** 为性能参量, 将其代入式 6, 推导控制测度自适应性能参量的数据模型:

$$P = E \times \left( 1 - e^{-\frac{2\pi E^2 \max\_p}{(\max\_thresh - \mu)^2}} \right) \cdot WQ \cdot I \quad (12)$$

化简:

$$P = c_1 \left( 1 - c_2 e^{-\frac{\max\_p}{(\max\_thresh - c_3)^2}} \right) \cdot WQ \cdot I \quad (13)$$

**c<sub>1</sub>** 为网络性能极值, **c<sub>2</sub> = e<sup>2πE<sup>2</sup></sup>** 是控制测度增益, **c<sub>3</sub>** 衡量控制测度控制范围, 当阈值控制测度与其相等, 则网络性能参量趋于常值不变, 说明网络带宽资源临界饱和。

模型 13 式将 **Wq**、**max\_p**、**maxthresh** 三个控制测度建立起与网络性能参量的逻辑联系, 由此我们得到通过控制测度对网络性能控制的自适应模型。

## 5 小结

基于 RED 仿真结果, 甄选数学模型建模, 构建控制测度的函数关系, 从而得到控制测度与网络性能之间的自适应关系, 模型化 RED 控制测度对网络性能的耦合关系, 提升 RED 优化度, 并增强可用性, 为 RED 拥塞控制行为提供控制原则。

(下转第 39 页)

### 参考文献

- 1 S Floyd, V Jacobson. Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397 - 413.
- 2 Ranjan P, Abed E H, La R J. Nonlinear Instabilities in TCP - RED. IEEE Infocom 2002 - the Conference on Computer Communication, 2002, 21(1): 249 - 258.
- 3 Dong Lin, Robert Morris. Dynamics of Random Early Detection, ACM SIGCOMM 1997 Conference, pages 127 - 137.
- 4 Ott T, Lakshman T, Wong L. SRED: Stabilized RED. IEEE Proc. INFOCOM. 1999, 1346 - 1355.
- 5 T. Zieghler, S. Fdida, C. Brandauer. Stability Criteria for RED with TCP Traffic, May 2000. Technical Report, <http://www.newmedia.at/tziegler/papers.html>.
- 6 Von Jacobson, Michael J. Karels. Congestion avoidance and control. ACM Computer Communication Review, 1988, 18(4): 314 - 329.
- 7 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 43 - 55.
- 8 Victor Firouiu, Marty Borden. A Study of Active Queue Management for Congestion Control. Infocom 2000, pages 1435 - 1444.
- 9 电子科技大学应用数学系. 线性代数. 四川: 电子科技大学出版社, 1995. 129 - 135.
- 10 电子科技大学应用数学系. 高等数学. 四川: 电子科技大学出版社, 1993. 382 - 383.
- 11 葛余博. 概率论与数理统计. 北京: 清华大学出版社, 2005. 59 - 61.
- 12 张筑生. 数学分析新讲第二册. 北京: 北京大学出版社, 1990. 18 - 26.