第九章 网络性能分析

第九章 网络性能分析

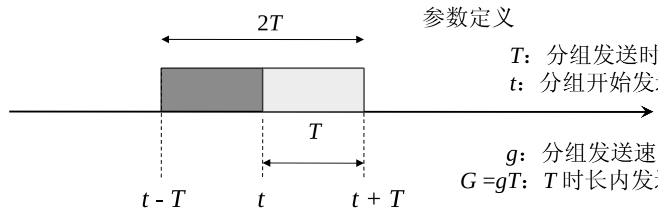
- 9.1 以太网吞吐性能
- 9.2 无线局域网吞吐性能
- 9.3 TCP吞吐性能

纯随机接入机制 Aloha 回顾

- 想说就说：随机发送
- 听不见再说：无应答重发

易损期

- Vulnerable period，可能发生冲突的时间区间
- 前一分组开始发送时间，大于 $t-T$
- 后一分组开始发送时间，小于 $t+T$



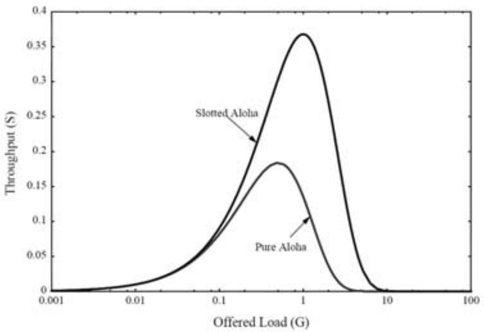
参数定义

T：分组发送时长
t：分组开始发送时间

g：分组发送速率
$G=gT$：T 时长内发送分组数

吞吐量

- 易损期内只一个分组到达的概率
- G 个分组随机到达，其中正确送到的分组数量



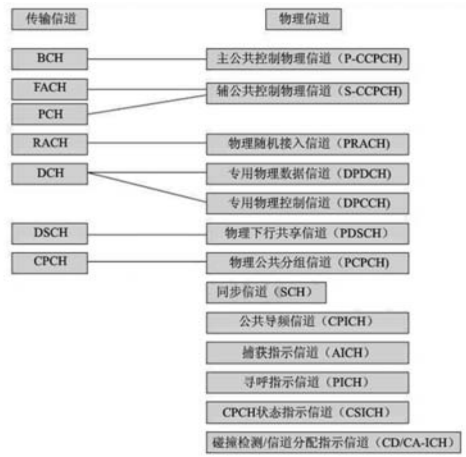
$$P_{suc} = e^{-2gT}$$
$$S = gTe^{-2gT} = Ge^{-2G}$$

极值条件：
$dS / dG = e^{-2G} (1 - 2G) = 0$

注：对数刻度

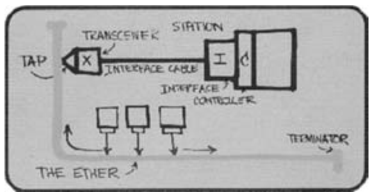
Aloha 的拓展应用

- 3G/4G的信道请求与分配(RACH)
- 带有快速捕获指示的时隙ALOHA方式
- 请求紧急呼叫、位置更新、响应寻呼时间同步、越区切换等



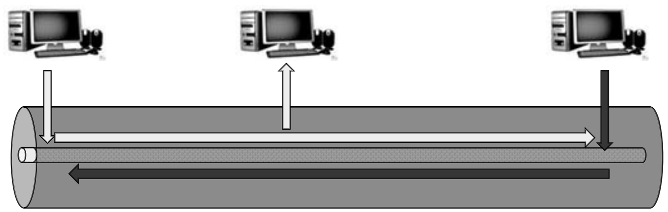
[REF] Vukovic I, Filipovich I. *Throughput analysis of TDD LTE Random Access Channel*[C]. PIMRC, 2011:1652~1656.

CSMA/CD分析



易损期、可测期的计算依据

- 信号传播 T_p 时长后，可以避免其他站冲突争用
- 冲突信息再传播 T_p 时长，才能被发送端检出

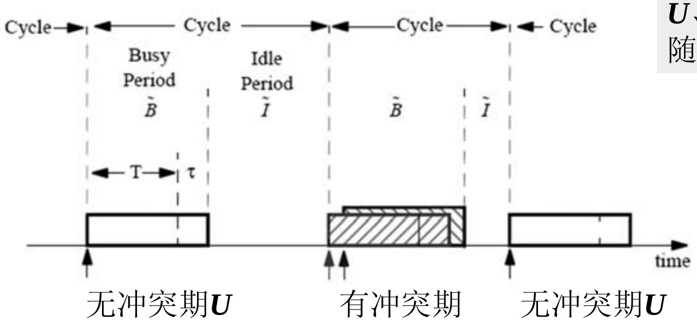


$$\tau = 51.2\mu s$$

分组传送时间 = ***T*** + \tau

传输过程的周期性

$\widetilde{U}$、$\widetilde{B}$和$\widetilde{I}$为随机变量



$$S = U/(B + I)$$

空闲时长与无冲突时长

空闲时长

即上一分组结束，到下一分组开始发送，之时间间隔

$$F_I(x) = \text{Prob}[\tilde{I} \le x] = 1 - \text{Prob}[\tilde{I} > x]$$
$$= 1 - P[\text{No packet scheduling during } x] = 1 - e^{-gx}$$

$$I = \frac{1}{g}$$

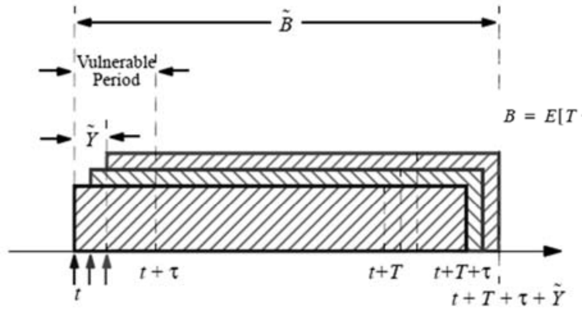
无冲突时长

$$U = \begin{cases} T & \text{Successful Period} \\ 0 & \text{Unsuccessful Period} \end{cases} \qquad U = E[\tilde{U}] = T \cdot P_{suc} + 0 \cdot (1 - P_{suc}) = TP_{suc}.$$

$$P_{suc} = \text{Prob}[\text{No arrival in the period } [t, t+\tau]] = e^{-g\tau}$$

$$U = Te^{-g\tau}.$$

有冲突的时长



$$E[\tilde{Y}] = \tau - \frac{1 - e^{-g\tau}}{g}$$

$$B = E[T + \tau + \tilde{Y}] = T + 2\tau - \frac{1 - e^{-g\tau}}{g}$$

$$F_Y(y) = \text{Prob}[\tilde{Y} \le y] = \text{Prob}[\text{No packet arrival during } \tau - y] = e^{-g(\tau - y)} \qquad 0 \le y \le \tau$$

$$f_Y(y) = e^{-g\tau}\delta(y) + ge^{-g(\tau - y)}$$

$y = 0$时，同时发出的分组，单独计入

CSMA的吞吐率

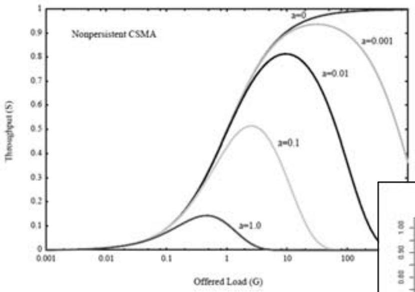
$$B = E[T + \tau + \tilde{Y}] = T + 2\tau - \frac{1 - e^{-g\tau}}{g} \qquad I = \frac{1}{g} \qquad U = Te^{-g\tau}.$$

$$S = \frac{U}{B + I} = \frac{Te^{-g\tau}}{T + 2\tau - \frac{1 - e^{-g\tau}}{g} + \frac{1}{g}} = \frac{gTe^{-g\tau}}{g(T + 2\tau) + e^{-g\tau}}$$

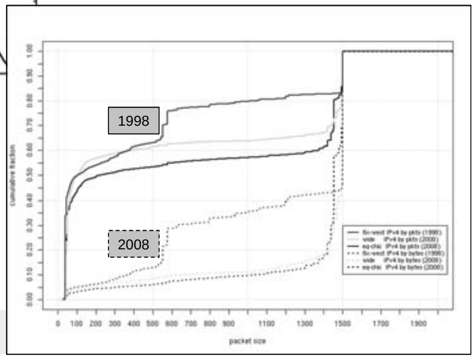
$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1 + 2a) + e^{-aG}}. \qquad a \triangleq \tau / T \qquad G = gT.$$

[Prob] S随G、a变化有无极值？

吞吐率与参数a的变化



[Prob.]
特定分布的IP分组长，吞吐率如何计算?



http://www.caida.org/research/traffic-analysis/pkt_size_distribution/graphs.xml

第九章 网络性能分析

- 9.1 以太网吞吐性能
- 9.2 无线局域网吞吐性能
- 9.3 TCP吞吐性能

IEEE 802.11标准类型

802.11	发布时间	Freq. (GHz)	带宽 (MHz)	速率 (Mb/s)	MIMO流数	调制	室内距离 (m)	室内距离 (ft)	室外距离 (m)	室外距离 (ft)
—	Jun 1997	2.4	20	1, 2	1	DSSS, FHSS	20	66	100	330
a	Sep 1999	5	20	6~54	1	OFDM	35	115	120	390
		3.7					—	—	5,000	16,000
b	Sep 1999	2.4	20	1~11	1	DSSS	35	115	140	460
g	Jun 2003	2.4	20	6~54	1	OFDM, DSSS	38	125	140	460
n	Oct 2009	2.4/5	20	7.2~ 72.2	4	OFDM	70	230	250	820
			40	15~150			70	230	250	820
ac	Jan 2014	5	20	up to 87.6	8					
			40	up to 200						
			80	up to 433.3						
			160	up to 866.7						
ad	Dec 2012	60	2,160	up to 6912 (6.75Gb/s)	1	OFDM				

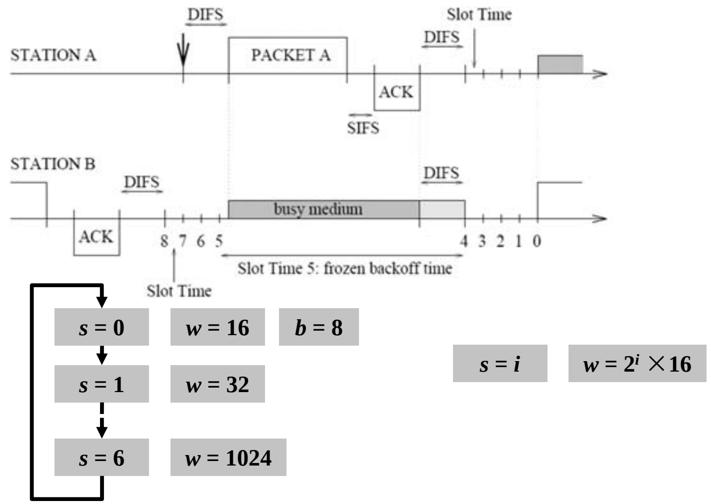
IEEE 802.11 BASIC

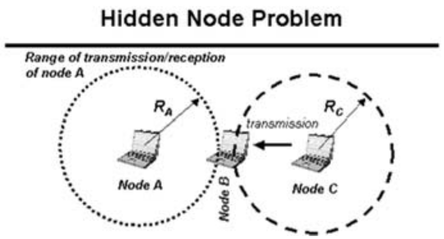
指数退避的发送控制

- 准备就绪时，在(0, w−1)一致性随机选择延后发送；
- 起始时 $w = CW_{min}$，最大不超过 CW_{max}；
- 冲突发生后，w 倍增；
- 如遇信道忙，w 冻结。

PHY	Slot Time (σ)	CW_{min}	CW_{max}
FHSS	50 μs	16	1024
DSSS	20 μs	32	1024
IR	8 μs	64	1024

退避与冻结过程示例



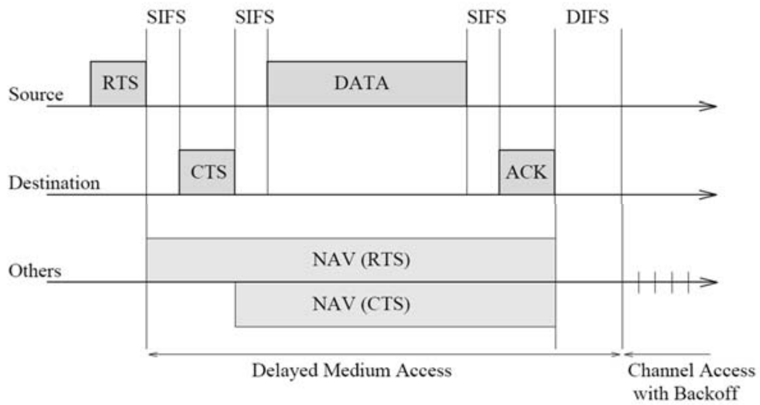


IEEE 802.11 DCF(CSMA/CA)

Bianchi, Giuseppe. “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function.” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* 2000, 18(3) : 535-547.

2014.3.24被引用6520次

DCF 4-way 握手



符号定义和假设条件

$b(t)$ 退避计数 $s(t)$ 退避阶段 $W_i = 2^i W \quad i \in (0,m)$

$W = CW_{\min} \quad CW_{\max} = 2^m W$ 退避阶段取值范围

$\{s(t), b(t)\}$ 状态 p 假设冲突概率衡定

$$\begin{cases} P\{i,k|i,k+1\} = 1 & k \in (0,W_i-2) \quad i \in (0,m) \\ P\{0,k|i,0\} = (1-p)/W_0 & k \in (0,W_0-1) \quad i \in (0,m) \\ P\{i,k|i-1,0\} = p/W_i & k \in (0,W_i-1) \quad i \in (1,m) \\ P\{m,k|m,0\} = p/W_m & k \in (0,W_m-1) \end{cases}$$

计数为*i*, 阶段为*k*

状态迁移概率

第*i*阶段，退避计数从 *k* +1，一定向*k* 迁移

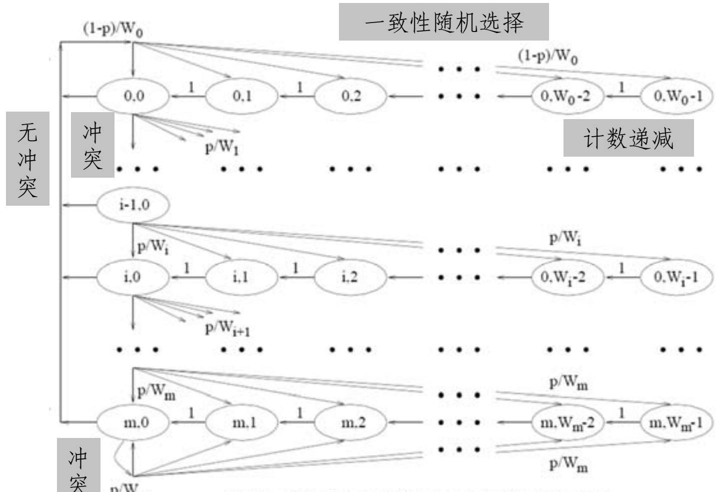
第*i*阶段，成功发送，回初始阶段，并在(0, w_0-1)之间随机选择退避计数

第*i*-1阶段，不成功发送，进入*i*阶段，并在(0, w_i-1)之间随机选择

第*m*阶段不成功发送，在(0, w_m-1)之间随机选择

$$\begin{cases} P\{i,k|i,k+1\} = 1 & k \in (0,W_i-2) \quad i \in (0,m) \\ P\{0,k|i,0\} = (1-p)/W_0 & k \in (0,W_0-1) \quad i \in (0,m) \\ P\{i,k|i-1,0\} = p/W_i & k \in (0,W_i-1) \quad i \in (1,m) \\ P\{m,k|m,0\} = p/W_m & k \in (0,W_m-1) \end{cases}$$

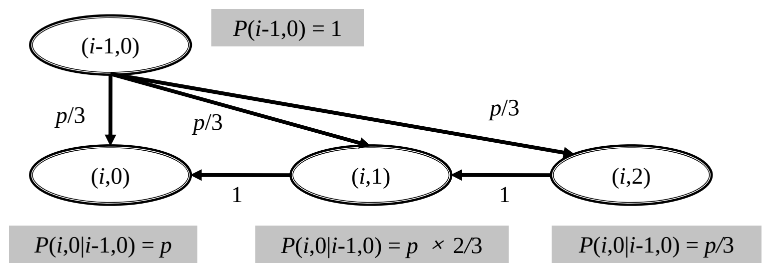
2D状态迁移图



Markov Chain model for the backoff window size

状态(*i*,0)的概率

出于简化，考虑 *w* = 3，阶段迁移概率为 *p*



平衡状态

$$b_{i,k} = \lim_{t\to\infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$$ 不随时间变化

$$b_{i-1,0}\cdot p = b_{i,0} \quad \rightarrow \quad b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0<i<m$$

$$b_{m-1,0}\cdot p = (1-p) b_{m,0} \quad \rightarrow \quad b_{m,0} = \tfrac{p^m}{1-p} b_{0,0}$$ 计数为0的概率

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1-p)\sum_{j=0}^{m} b_{j,0} & i=0 \\ p\cdot b_{i-1,0} & 0<i<m \\ p\cdot (b_{m-1,0}+b_{m,0}) & i=m \end{cases}$$

$$\downarrow$$

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad i\in(0,m), k\in(0,W_i-1)$$ 计数不为0的概率

归一化条件

$$W_i = 2^i W \qquad b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0<i<m \qquad b_{m,0} = \tfrac{p^m}{1-p} b_{0,0}$$

$$1 = \sum_{i=0}^{m}\sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1}\frac{W_i-k}{W_i} = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0}\frac{W_i+1}{2} =$$

$$= \frac{b_{0,0}}{2}\left[W\left(\sum_{i=0}^{m-1}(2p)^i + \frac{(2p)^m}{1-p}\right) + \frac{1}{1-p}\right]$$

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}$$

站点发送概率

$$\tau = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}$$

$$b_{i-1,0}\cdot p = b_{i,0} \quad \rightarrow \quad b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0<i<m$$

$$b_{m-1,0}\cdot p = (1-p) b_{m,0} \quad \rightarrow \quad b_{m,0} = \tfrac{p^m}{1-p} b_{0,0}$$

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)}$$

冲突概率与发送概率的关系

一个站点在发送时，n -1个站点不发送，则不发生冲突；反之则发生冲突：

$$p = 1-(1-\tau)^{n-1}$$

至少有一站点发送的概率：

$$P_{tr} = 1-(1-\tau)^n$$

有一个成功发送的概率：

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n}$$

发生成功发送的概率：

$$P_{tr}P_s$$

吞吐性能的表达式

$$S = \frac{E\,[\text{payload information transmitted in a slot time}]}{E\,[\text{length of a slot time}]} = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr}(1-P_s) T_c}$$

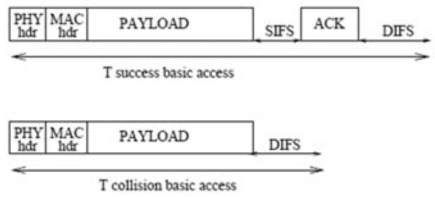
无分组发送的时长

分组发送的时长

分组发送冲突的持续时长

平均分组长度

BAS

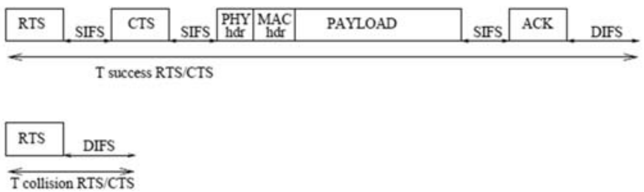


信道传波时间

$$\begin{cases} T_s^{bas} = & H + E[P] + \text{SIFS} + \delta + \text{ACK} + \text{DIFS} + \delta \\ T_c^{bas} = & H + E[P^*] + \text{DIFS} + \delta \end{cases}$$

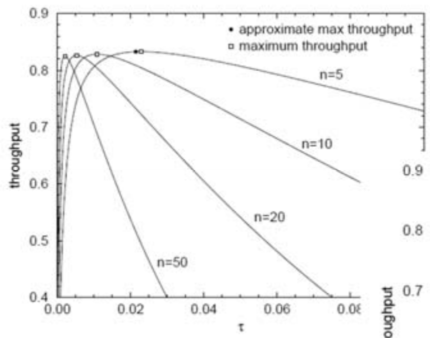
冲突发生时分组发送长度

DCF

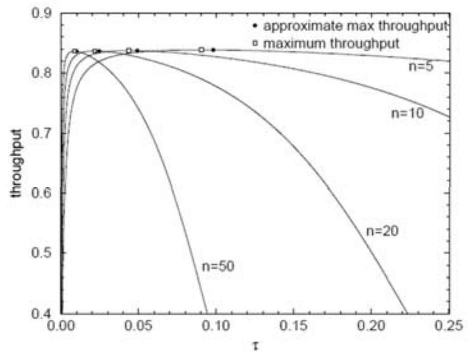


$$\begin{cases} T_s^{rts} = & \text{RTS} + \text{SIFS} + \delta + \text{CTS} + \text{SIFS} + \delta + H + \\ & + E[P] + \text{SIFS} + \delta + \text{ACK} + \text{DIFS} + \delta \\ T_c^{rts} = & \text{RTS} + \text{DIFS} + \delta \end{cases}$$

吞吐性能与发送概率的关系



BAS



DCF

最大吞吐性能

$$S = \frac{E[P]}{T_s - T_c + \frac{\sigma(1-P_{tr})/P_{tr} + T_c}{Ps}}$$

等效表示

最大值条件:

$$\frac{Ps}{(1-P_{tr})/P_{tr} + T_c/\sigma} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{T_c^* - (1-\tau)^n (T_c^* - 1)} \qquad T_c^* = T_c/\sigma$$

上式极值条件:

$$(1-\tau)^n - T_c^*\{n\tau - [1-(1-\tau)^n]\} = 0$$

低负载的近似:

$$(1-\tau)^n \approx 1 - n\tau + \frac{n(n-1)}{2}\tau^2 \qquad \tau << 1$$

$$\tau = \frac{\sqrt{[n+2(n-1)(T_c^*-1)]/n} - 1}{(n-1)(T_c^*-1)} \approx \frac{1}{n\sqrt{T_c^*/2}}$$

第九章 网络性能分析

9.1 以太网吞吐性能

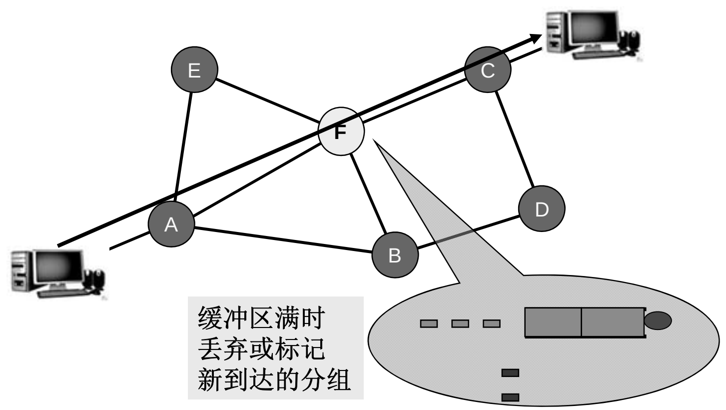
9.2 无线局域网吞吐性能

9.3 TCP吞吐性能

Misra V, Gong W B, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[C]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM, 2000, 30(4): 151-160.
2014.4.2, 引用数1428.

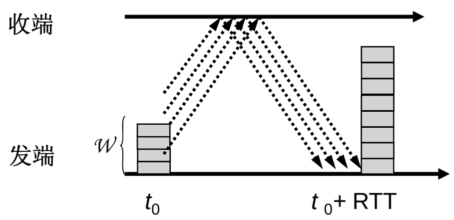
TCP与RED工作机理

路由器处理分组的方式



TCP拥塞控制

- 发送窗口*w*，未收到确认时可发送的分组数
- 随交互控制，动态变化：
  - 无丢失时，每RTT时长，增加1个MSS
  - 有丢失时，减半



RTT时长内 *w* 的变化率
d*w* = dt×*w*/RTT

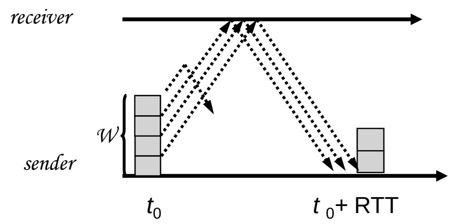
$w(t_0) = 4$
$w(t_0+\mathrm{RTT}) = 8$

$w(t) = \exp(w_0 t)$
$\sim 1 + w_0 t$

TCP拥塞控制

- 发送窗口w，未收到确认时可发送的分组数
- 随交互控制，动态变化：
  - 无丢失时，每RTT时间增加1
  - 有丢失时，减半

分组发送速率=**w/RTT**
分组丢失概率率为***p***



$dw = -(w/2)\times(w/\mathrm{RTT})\times p$

$w(t_0) = 4$
$w(t_0+\mathrm{RTT}) = 2$

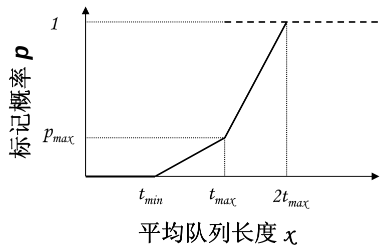
主动队列管理

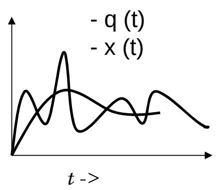
- RED: *Random Early Detect* proposed in 1993
- Proactively mark/drop packets in a router queue probabilistically to
  - Prevent onset of congestion by reacting early
  - Remove synchronization between flows

RED管理机制

RED: 基于平均队列长度**x (t)**，对分组做标记或丢弃

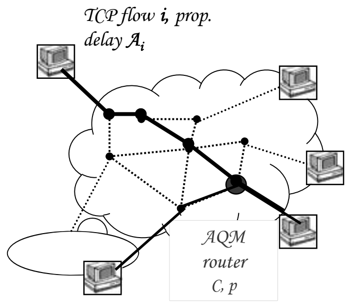
x (t): q (t)的平滑时间加权平均





动力学分析模型

单路由器RED模型



- AQM路由器
  - 服务容量 ： ***C*** **(pkt/sec)**
  - 缓冲长度：***q*(*t*)**
  - 丢失概率：***p*(*t*)**
- ***N*个TCP流**
  - 窗口大小：$W_i(t)$
  - 来回时间：$R_i(t) = A_i + q(t)/C$
  - 吞吐率： $B_i(t) = W_i(t)/R_i(t)$

系统差分方程

窗口变化: $$\frac{dW_i}{dt} = \frac{1}{R_i(q(t))} - \frac{W_i}{2} \times \frac{W_i(t-\tau)}{R_i(q(t-\tau))} p(t-\tau)$$

加性增长　　乘性衰减　　丢失率

排队长度变化: $$\frac{dq}{dt} = -1_{[q(t)>0]} C + \sum \frac{W_i(t)}{R_i(q(t))}$$

输出速率　　到达数据

队长和丢失率的关系

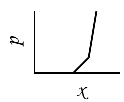
平均排队长度: $$\frac{dx}{dt} = \frac{\ln(1-\alpha)}{\delta} x(t) - \frac{\ln(1-\alpha)}{\delta} q(t)$$

α = 加权平均因子

δ = 平滑计算周期~ $1/C$

丢失率: $$\frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dx}\frac{dx}{dt}$$

$$\frac{dp}{dx} \Leftarrow$$



多瓶颈网络模型

M 个**RED**排队系统, ***K*** 个**TCP**类别，n_k个**TCP**流

$$\frac{d\bar{W}_k(t)}{dt} = \frac{1}{R_k(q)} - \frac{\bar{W}_k(t)\bar{W}_k(t-\tau_k)}{2R_k(q(t-\tau_k))} p_k(x(t-\tau_k)) \quad 1 \le k \le K,$$

$$\frac{dq_m(t)}{dt} = -1_{q_m(t)} C_m + \sum_{k=1}^{K} \frac{n_k A_{k,m} \bar{W}_k}{R_k(q)}$$

$$\frac{dx_m(t)}{dt} = -w_m x_m(t) + w_m q_m(t)$$

$$p_m(t) = f_{red}(x_m(t)) \quad 1 \le m \le M$$

固定步长Runge-Kutta数值求解

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y(t))$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}[k_{n,1} + 2k_{n,2} + 2k_{n,3} + k_{n,4}]$$

$$k_{n,1} = f(t_n, y_n) \quad k_{n,2} = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_{n,1})$$

$$k_{n,3} = f(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_{n,2}) \quad k_{n,4} = f(t_n + h, y_n + hk_{n,3})$$

第九章网络性能分析

9.1 对比分析纯Aloha和时隙Aloha的最大吞吐性能，并说明时隙Aloha需要支持的额外技术要求。

9.2 时隙Aloha系统的终端站，本地时钟相对于标准时钟的偏差，最大为分组发送时长的一半，试求系统最大吞吐性能。

9.3 延用CSMA性能分析方法，求CSMA/CD的吞吐性能。

9.4 考虑路由器采用尾部丢弃缓冲区管理方法，给出TCP吞吐性能的分析思路。