

# 信道竞争感知的多速率多跳无线网络时延路由测量

陈伟, 秦志光, 邓蔚, 聂鹏

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**根据IEEE 802.11 DCF基本访问模式,建立了无线链路传输模型和信道竞争模型,定义了链路和节点对共享信道的竞争度,提出了信道竞争感知的多速率多跳无线网络端到端时延路由测量CCAD。基于无线链路传输模型和信道竞争度计算链路及传输路径的时延,实现了对多速率多跳无线网络中链路的质量、传输速率以及信道竞争的测量。NS2仿真实验结果表明,CCAD的性能明显优于ETX、ETT和MIC等现有的路由测量。

**关键词** 信道竞争; 端到端时延; 多跳无线网络; 路由测量; 链路传输模型

中图分类号 TN915

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.05.005

## Channel Competition Aware Delay Routing Metric for Multi-Rate and Multi-Hop Wireless Networks

CHEN Wei, QIN Zhi-guang, DENG Wei, and NIE Peng

(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Link quality, transmission rate of wireless links and channel competition among them determine the transmission capacity of multi-rate and multi-hop wireless networks together. This paper first builds a transmission mode and channel competition mode of wireless links, according to IEEE 802.11 DCF basic mode, and then gives the channel competition degree definitions both of wireless link and node, and finally proposes a channel competition aware end-to-end delay routing metric (CCAD) for multi-rate and multi-hop wireless networks. CCAD calculates the delays of wireless link and route, based on the transmission mode of wireless links and the channel competition degree of wireless nodes. As a result, link quality, transmission rate and channel competition are captured and measured together. NS2 simulation results show CCAD outperforms other metrics that have appeared in the literature, such as ETX, ETT and MIC.

**Key words** channel competition; end-to-end delay; multi-hop wireless networks; routing metric; transmission mode of link

以无线Ad hoc、无线网状网<sup>[1]</sup>和无线传感器网络为代表的多跳无线网络由于不需网络基础设施,具有低成本、易部署、自组织、自修复等优点,受到了广泛的关注<sup>[2]</sup>。

多跳无线网络具有广播传输、信道共享、链路不可靠、链路不稳定以及多速率甚至多信道等特性。其中广播传输和信道共享,使相邻链路之间的传输相互干扰和冲突<sup>[3-4]</sup>。IEEE 802.11 MAC协议采用分布式协调功能DCF协调和控制无线链路对共享信道的访问<sup>[5]</sup>,DCF通过信道竞争机制,大幅减少共享信道的邻近无线链路间的传输干扰和冲突。

路由直接决定网络传输性能,路由测量作为路由协议选择路由的标准和依据又直接影响和决定着

路由协议的性能<sup>[2,6]</sup>,路由以及路由测量一直是多跳无线网络研究的热点<sup>[6-7]</sup>。多跳无线网络中传输路径的长度、链路的质量(丢包率)、链路的传输速率以及共享信道的链路间的信道竞争等都对网络的传输性能产生影响,使多跳无线网络的路由成为一个极具挑战的问题。路由测量是否有效地捕捉和反映传输路径长度、链路质量、链路传输速率以及信道竞争<sup>[8]</sup>对网络传输的影响,是路由协议能否充分发挥多跳无线网络传输性能的关键。

现有多跳无线网络路由协议大部分基于跳数(hop count)路由测量,该路由测量选择跳数最少的路径(最短路径)作为传输路径。最短路径通常由长距离的链路构成,根据无线信号传播模型,长距离链路

收稿日期: 2010-09-02; 修回日期: 2012-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(60973118); 国家863项目(2009AA01Z422)

作者简介: 陈伟(1978-),男,博士生,主要从事无线网络路由、网络安全等方面的研究。

通常具有较差的数据包传输率和较低的传输速率, 因此跳数路由测量选出的路径通常具有较差的传输性能。

文献[9]提出期望传输数量(expected transmission count, ETX)路由测量, 一条链路的ETX定义为该链路成功地传输一个数据包所需要的平均传输次数, ETX仅量化了无线链路质量对网络传输的影响。文献[10]提出期望传输时延(expected transmission time, ETT), ETT在ETX的基础上增加了对链路传输速率的考虑。一条链路的ETT是该链路成功地传输一个数据包所需的期望传输时间。

针对多信道多跳无线网络, 文献[10]还提出累计加权期望传输时间(weight cumulative expected transmission time, WCETT), WCETT在ETT的基础上考虑了传输路径上信道多样性对网络传输性能的影响。文献[11]提出干扰和信道切换路由测量(metric of interference and channel switching, MIC), MIC在WCETT的基础上同时考虑了数据流内和数据流外的传输干扰以及信道多样性对网络传输性能的影响。针对WCETT仅考虑数据流内传输干扰的问题, 文献[12]提出干扰感知路由测量iAWARE, iAWARE通过信干噪比和信噪比的比率同一量化数据流内和数据流外的传输干扰。WCETT、MIC和iAWARE都不能准确地量化信道竞争对网络传输的影响, 而且它们都不具有保序性, 从而不能用于链路状态路由协议<sup>[6]</sup>。

文献[8]提出一种考虑链路有效的带宽和传输速率的传输时间路由测量ATT。文献[13]提出了一个依赖于帧到达概率模型的物理干扰模型, 以及基于该干扰模型的干扰感知无线路由测量。文献[14]考虑了链路在传输路径上相对位置对路径传输性能的影响, 提出了一种端到端期望传输次数路由测量ETOP。上述文献仍然没有捕捉和测量共享信道的链路间信道竞争对网络传输的影响。

针对现有路由测量不能准确、有效地捕捉和反映无线链路质量、无线信道传输速率以及信道竞争对多跳无线网络传输性能的影响, 本文在现有路由测量研究的基础上, 基于IEEE 802.11 MAC DCF建立无线链路传输模型以及信道竞争模型, 并定义链路和节点对共享信道的竞争度, 提出了信道竞争感知的多速率多跳无线网络端到端时延路由测量(channel competition aware end-to-end delay routing metric, CCAD)。

## 1 IEEE 802.11 MAC DCF

IEEE802.11MAC协议分布式协调功能, (distributed coordination function, DCF)提供分布式的信道接入控制, 被广泛用于多跳无线网络。DCF基于载波侦听多址接入/冲突避免(CSMA/CA)协议, 它定义了两种访问模式: 基本访问模式和RTS/CTS访问模式。RTS/CTS访问模式通过发送节点和接收节点在数据传输前进行一次RTS/CTS握手建立信道预留的虚拟载波侦听机制, 但是根据无线干扰模型, 最大载波侦听距离通常大于最大传输距离的两倍, 此时接收节点的所有邻居节点都能侦听到发送节点的传输而退避对信道的访问, 因此RTS/CTS握手机制不再必要<sup>[15-16]</sup>。

DCF基本访问模式的时序图如图1所示, 节点在发送数据前, 首先检测信道是否空闲, 当信道持续空闲超过一个分布式帧间间隔DIFS时, 节点立即占用信道进行数据传送, 否则节点推迟信道访问进入等待状态, 直到信道持续空闲DIFS时长, 然后节点从其竞争窗口中随机选择一个数开始倒计时退避。节点倒计时退避期间, 如果检测到信道忙将立即挂起其退避计数器。在信道再次持续空闲DIFS时, 长时恢复倒计时器继续倒计时; 在倒计时器归零且信道持续空闲DIFS时, 节点才占用信道开始传输。节点完成数据发送后等到接收节点的应答ACK, 若在一个短帧间间隔SIFS时长后没有收到ACK, 节点将其竞争窗口增大一倍进行重传。节点每次收到ACK后, 将其竞争窗口恢复为初始值——最小竞争窗口。

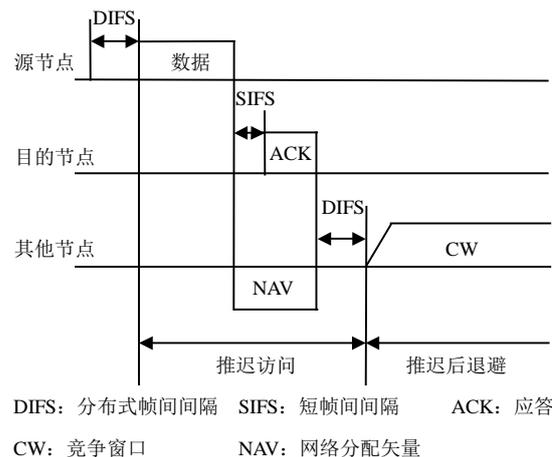


图1 IEEE 802.11 DCF基本访问模式时序图

## 2 无线链路传输模型

根据IEEE 802.11 DCF信道访问机制, 一条有传输需求的链路总是处于信道忙等待、信道空闲退避

以及传输尝试等3种状态之一。无线链路的传输模型如图2所示,图中“忙”和“闲”分别表示信道忙和信道空闲。

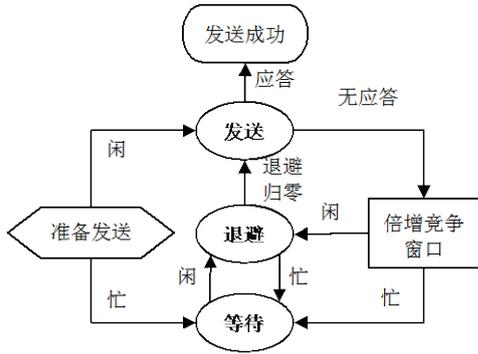


图2 IEEE 802.11 DCF无线链路传输模型

同一时刻相邻区域中共享信道的无线链路中,只有一条链路能占用信道进行传输,而其余所有竞争信道的链路都必须进入等待状态,并从其竞争窗口中随机选择一个数值,设置其二进制退避倒数计数器。当信道由忙转入空闲状态时,处于等待状态的链路启动倒数计数器开始退避,从而进入退避状态。先结束退避的链路先占用信道进行发送,而其他退避未结束的链路挂起其退避计数器,再次进入等待状态。当信道再次空闲时,挂起退避计数器的链路继续倒数退避。退避计数器归零且信道空闲时,链路将进入发送状态,占用信道进行传输尝试,如果没有收到应答,链路将倍增其竞争窗口,然后竞争信道进行重传。

### 3 信道竞争模型

IEEE 802.11 MAC DCF通过信道竞争机制控制和协调链路对共享信道的访问,从而减少传输干扰和冲突。信道竞争模型定义如下:

**定义 1** 所有发送端位于一条链路发送节点的最大载波侦听范围内,且与该链路共享信道的节点都是该链路的信道竞争邻节点。

以一个节点为发送端的所有链路称为该节点的发送链路集,一条链路的信道竞争邻节点通过其发送链路集与该链路竞争信道的访问。

#### 3.1 无线链路信道竞争度

根据链路传输模型,共享信道空闲时所有竞争信道的链路同时进入退避状态,当其中某一链路率先结束退避而占用信道时,其其余退避的链路同时挂起它们的退避计数器进入等待状态。因此,在任一段时间内,所有竞争共享信道的链路处于退避状态的时间是相同的。显然,退避相同的时间,发起

传输尝试次数较多或每次传输尝试耗时较长的链路,将占用较多的共享信道时间,从而具有较强的信道竞争能力。由此,定义无线链路对共享信道的竞争度如下:

**定义 2** 无线链路对共享信道的竞争度 $l_{cc}$ 是该无线链路在成功传输一个数据包的周期内,占用共享信道进行传输的时间 $T_t$ 与退避竞争的时间 $T_b$ 的比值,有:

$$l_{cc} = \frac{T_t}{T_b} \quad (1)$$

#### 3.2 无线节点信道竞争度

无线节点对共享信道的竞争体现为它的发送链路集中的链路对共享信道的竞争。以节点为发送端的链路有多条,这些链路由于在链路质量上存在差别,因而对共享信道具有不同的信道竞争度,因此节点对信道的竞争度由它的发送链路集中参与信道竞争的链路决定。然而一段时间内节点的发送链路集中,哪些链路参与信道竞争与网络负载以及路由策略有关,在路由测量时难以预测和确定。为了简化问题,本文假设节点发送链路集中的链路参与信道竞争的概率相等,定义节点对共享信道的竞争度如下:

**定义 3** 一个节点对共享信道的竞争度 $n_{cc}$ 是该节点在有传输需求时,其发送链路集中所有链路信道竞争度的平均值,即:

$$n_{cc} = \frac{p_{cc}}{m} \sum_{j \in \text{SLS}} l_{cc_j} = \frac{p_{cc}}{m} \sum_{j \in \text{SLS}} \frac{T_{t_j}}{T_{b_j}} \quad (2)$$

式中, $p_{cc}$ 是节点的信道竞争概率,等于节点数据包队列非空的概率; $m$ 是无线节点的出度;SLS表示节点的发送链路集。

### 4 无线链路及路径的时延

无线链路时延是该无线链路成功传输一个数据帧所消耗的时间。根据无线链路传输模型,无线链路成功传输一个数据帧所消耗的时间是其处于等待状态、退避状态和传输状态的时间的总和。因此无线链路时延 $D_l$ 计算如下:

$$D_l = T_t + T_b + T_w \quad (3)$$

式中, $T_t$ 、 $T_b$ 和 $T_w$ 分别表示链路 $l$ 的传输时延、退避时延以及等待时延。

无线链路的传输时延是该链路成功传输一个数据包所需的传输尝试时间的总和,计算如下:

$$T_t = N \frac{L}{R} \quad (4)$$

式中,  $L$ 表示一个数据包的缺省长度;  $R$ 表示链路的传输率;  $N$ 是链路成功传输一个数据包的期望传输次数, 即:

$$N = \frac{1}{p_f p_r} \quad (5)$$

式中,  $p_f$ 和 $p_r$ 分别是链路的正向和反向链路质量, 因此链路的传输时延为:

$$T_t = \frac{L}{p_f p_r R} \quad (6)$$

无线链路的退避时延是链路成功传输一个数据包的周期内所有退避时间的总和, 其期望值为:

$$\begin{aligned} T_b &= \sum_{j \leq N} E(CW_j) \phi = \\ &= \sum_{j=1}^{j=N} E(2^{j-1} CW_0) \phi = \\ &= \frac{2^{N-1} - 1}{2} CW_0 \phi \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\phi$ 是退避时隙; 函数 $E$ 为从无线链路的竞争窗口 $CW_j$ 中, 随机地选择第 $j$ 次传输尝试的退避计数值;  $CW_0$ 是链路的初始竞争窗口。

根据无线链路传输模型, 当无线链路处于等待状态时, 当前共享信道必然被该链路的某个信道竞争邻节点所占用, 因此, 无线链路的等待时延是在它成功地传输一个数据包期间, 其所有信道竞争邻节点占用共享信道进行传输尝试的时间的合集, 有:

$$T_w = \bigcup_{i \in CCS} T_{t_i} \quad (8)$$

式中,  $CCS$ 表示链路的信道竞争邻节点集;  $T_{t_i}$ 表示信道竞争邻节点 $i$ , 在链路成功地传输一个数据包期间的传输尝试时间。

链路的信道竞争邻节点中可能有少量的邻节点不相互竞争信道, 然而在DCF的协调和控制下, 不相互竞争信道的信道竞争邻节点占用信道时间叠加的概率很小, 因此信道竞争邻节点的传输尝试时间合集近似于传输尝试时间的总和, 即:

$$T_{w_i} \approx \sum_{i \in CCS} T_{t_i} \quad (9)$$

根据本文对信道竞争度的定义, 在链路成功传输一个数据包期间, 它的信道退避时间与其所有信道竞争邻节点的退避时间相等都为 $T_b$ , 则有:

$$\begin{aligned} T_w &\approx \sum_{i \in CCS} n_{cc_i} T_b = \\ &= T_b \sum_{i \in CCS} \frac{p_{cc_i}}{m} \cdot \sum_{j \in SLS_i} \frac{T_{t_j}}{T_{b_j}} \end{aligned} \quad (10)$$

式(6)、式(7)和式(10)分别计算链路的传输、退避和等待时延, 链路的传输、退避和等待时延的总和就是该链路的时延。一条无线路径 $p$ 的端到端时延 $D_p$ 是构成该路径的无线链路的时延之和, 有:

$$D_p = \sum_{l \in p} D_{l_i} \quad (11)$$

## 5 仿真实验与结果分析

通过NS2<sup>[17]</sup>网络真实实验评估本文提出的CCAD路由测量的性能, 仿真实验分别以端到端时延和吞吐量为性能指标, 以ETX、WCETT和MIC等路由测量为比较对象。模拟网络为在1 000 m×1 000 m的区域内随机分布了36个静态无线节点的多速率多跳无线网络。仿真实验网络层采用DSDV<sup>[18]</sup>路由协议, 业务流采用固定码率(CBR)模型, 每个节点随机地从802.11b支持的传输速率(1 Mbps、2 Mbps、5.5 Mbps和11 Mbps)中选择一个作为自己的固定传输速率, 每个数据包负载为1 KB, 节点的传输范围为250 m, 最大载波侦听范围为550 m。实验随机从模拟网络中选择2对、5对、10对、15对和20对源、目的节点进行5组数据传输实验, 每组实验先后采用ETX、ETT、MIC和CCAD路由测量算法选择路由进行数据传输, 从而对比分析CCAD在不同网络数据流负载的场景中的性能。

图3和图4显示了网络中注入的数据流不断增加时, 4种路由测量算法对应的平均端到端时延和吞吐量的变化情况。随着网络中数据流的增多, 邻节点间的信道竞争程度逐渐升高, 造成链路的信道等待时延增加, 从而致使网络端到端时延的增加以及吞吐量的下降。在数据流从5个上升到10个时, 网络的平均端到端时延增加以及平均端到端吞吐量下降的幅度最大, 表明此时网络中邻节点间的信道竞争程度升幅最大; 当数据流从10个增加到15个, 网络的平均端到端时延增加和平均端到端吞吐量下降的速度均放慢, 表明此时网络中邻节点间的信道竞争程度的增速下降; 在数据流达到15个时, 网络中绝大多数节点都具有传输请求, 此时数据流数的再次上升对邻节点间的信道竞争程度的影响不太明显, 因此网络平均端到端时延和吞吐量的变化都不再明显。

MIC和CCAD能够感知信道竞争, 从而选择受信道竞争影响较少的传输路径, 因此相比ETX和ETT具有明显的性能优势。CCAD能够比较准确地测量信道竞争, 能够因此在不同网络负载不断升高因此具有最佳的性能。

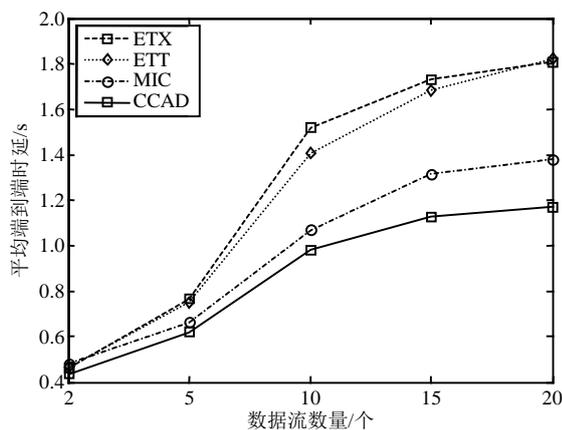


图3 平均端到端时延随数据流数的变化

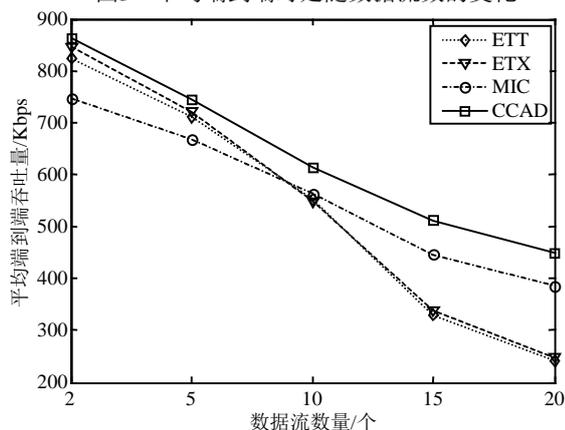


图4 平均端到端吞吐量随数据流数的变化

## 6 结论

多速率多跳无线网络的链路质量、链路传输速率和信道竞争共同影响和决定它的传输性能。路由测量准确地测量和反映链路质量、链路传输速率和信道竞争，是路由协议充分发挥多速率多跳无线网络传输性能的保证。本文根据IEEE 802.11 DCF基本访问模式建立了无线链路传输模型和信道竞争模型，结合上述两个模型定义链路和节点对共享信道的竞争度，提出了信道竞争感知的多速率多跳无线网络端到端时延路由测量CCAD，CCAD基于无线链路传输模型和信道竞争度计算链路和路径的时延，实现对多速率多跳无线网络中链路的质量、传输速率和信道竞争的测量。NS2仿真实验结果显示，CCAD在端到端时延和吞吐量上的性能明显都优于ETX、ETT和MIC等现有的路由测量。

### 参考文献

[1] AKYILDIZ I F, WANG X. A survey on wireless mesh networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(9): 23-30.  
 [2] ZHAI H, FANG Y. Impact of routing metrics on path capacity in multirate and multihop wireless Ad hoc networks[C]//IEEE

ICNP '06. Santa Barbara: IEEE, 2006: 86-95.  
 [3] PADHYE J, AGARWAL S, PADMANABHAN V N, et al. Estimation of link interference in static multi-hop wireless networks[C]//The 5th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. Berkeley, USA: ACM, 2005.  
 [4] JAIN K, PADHYE J, PADMANABHAN V N, et al. Impact of interference on multi-hop wireless network performance [J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 471-487.  
 [5] IEEE-802.11. wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. IEEE Std, 2007.  
 [6] YANG Y, WANG J. Design guidelines for routing metrics in multihop wireless networks[C]//IEEE INFOCOM 2008. Phoenix, USA: IEEE, 2008.  
 [7] BAUMANN R, HEIMLICH S, STRASSER M, et al. A Survey on routing metrics TIK report 262[R]. Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH-Zentrum, Tech Rep TIK Report 262, 2007.  
 [8] SUN Yan-jing, LIU Xue, ZHANG Bei-bei. An available transmission time routing metric for wireless Ad hoc sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2011, (2011): 79-85.  
 [9] COUTO D, AGUAYO D, BICKET J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 419-434.  
 [10] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks[C]//10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. PA, USA: ACM, 2004.  
 [11] GENETZAKIS M, SIRIS V A. A contention-aware routing metric for multi-rate multi-radio mesh networks[C]//The SECON '08. San Francisco, USA: IEEE, 2008.  
 [12] SUBRAMANIAN A P, BUDDHIKOT M M, MILLER S. Interference aware routing in multi-radio wireless mesh networks[C]//WiMesh 2006. Reston, USA: ACM, 2006.  
 [13] RIDUAN M. ABID B S. An interference-aware routing metric for wireless mesh networks[J]. International Journal of Mobile Communications, 2011, 9(6): 619-641.  
 [14] JAKLLARI G, EIDENBENZ S, HENGARTNER N. Link positions matter: a noncommutative routing metric for wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(1): 61-72.  
 [15] GAO Y, CHIU D M, LUI J. Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications[C]//Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. Saint Malo, USA: ACM, 2006.  
 [16] CHATZIMISIOS P, BOUCOUVALAS A C, VITSAS V. Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 a wireless LANs[J]. Electronics Letters, 2004, 40(14): 915-916.  
 [17] FALL K, VARADHAN K. The ns-2 manual[J/OL]. VINT Project. [2002-05-10]. [http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns\\_doc.pdf](http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf).  
 [18] PERKINS C, BHAGWAT P. Highly dynamic destination-sequenced distance vector routing[C]//ACM SIGCOMM. New York, USA: ACM, 1994.