

# 异构网络中丢包识别研究综述<sup>\*</sup>

叶 进<sup>1,2</sup> 王建新<sup>1</sup>

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)<sup>1</sup> (桂林电子科技大学 桂林 541004)<sup>2</sup>

**摘 要** 异构网是将具有不同媒体、不同性能的子网统一构建成的单个逻辑网络,在这种网络中随着信道的变化丢包事件会更频繁地发生,同时丢包的原因比单一网络环境更加复杂,为有线环境设计的传统 TCP 不能满足应用的要求,因此改进 TCP 协议成为异构网中研究的热点。本文在研究各种 TCP 协议的基础上,深入分析了其中丢包识别这一关键问题,概括了丢包识别的一般性策略,然后对典型的区分丢包原因的方法进行了归纳和比较,最后提出了通过丢包控制提高异构网性能的研究方向,为各种环境下 TCP 协议的改进提供了较好的研究基础。

**关键词** 异构网络,拥塞控制,差错控制,丢包识别,跨层设计

## The Research of Loss Differentiation Algorithm in Heterogeneous Networks

YE Jin<sup>1,2</sup> WANG Jian-Xin<sup>1</sup>

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

**Abstract** As the development of computer network, a single logical overlay network composed of many heterogeneous networks is becoming popular. The key difference of these networks is more loss event as channel characters changes frequently and loss cause is much more complicated than the single network. The traditional TCP protocol is designed for wire circumstance and is evidently poor in such circumstance. Then it is becoming a hot area in heterogeneous networks to evaluate TCP protocol. Studying various TCP protocols, especially the key problem of loss differentiation, we summarize the general strategies for loss differentiation algorithm and analysis some kinds of approaches on loss differentiation. We then give the research directions of how to control losses and improve the TCP performance, which is necessary for further study on TCP improvement over heterogeneous networks.

**Keywords** Heterogeneous network, Congestion control, Error control, Loss differentiation algorithms, Cross-layer design

## 1 引言

从应用的角度来看,有各种不同的无线环境,最常见的无线网络包括卫星通信网、ad hoc 通信网以及一般的无线平台,比如无线局域网、蓝牙、无线本地网和蜂窝系统等,将这些具有不同媒体、不同性能的子网统一构建成的单个逻辑网络就是异构网。随着移动因特网技术的发展,这种异构网越来越成为当今网络的主角。

在异构网中,TCP 的设计必须考虑不同网络的特征及其需要,例如,卫星网具有较大的传播时延,ad hoc 网没有固定的拓扑结构等,传统 TCP 把所有的丢包简单归结为网络拥塞而盲目采取控制策略,这样就极大降低了 TCP 的性能。因为异构网中丢包是复杂的,除了拥塞丢包之外,物理层特殊传输介质的中断、链路层媒体接入控制的失败、网络层动态路由的变化以及传输层控制协议的错误,都可能引起丢包。总的来说,丢包大致可以分为两大类:一类是由于缓冲溢出导致的拥塞丢包,即 Congestion Loss;另一类是由于信号错误导致的随机丢包,即 Wireless Loss。因此丢包控制应当既包括拥塞控制和差错控制,又不等同于两者之和。在异构网络中,区分出丢包的原因,使得发送端能够对如何调整拥塞窗口等作出正确的判断,是 TCP 设计的首要目标。

丢包识别的一般性过程是:首先通过分析获得与某种丢包相关的网络特征信息;然后测量这些特征属性;最后根据决策规则得到判断结果。判断的依据有:(1)端到端信息,即 TCP 的某些状态变量;(2)底层信息,即物理层和数据链路层的状态变量;(3)显示反馈信息;(4)其它测量信息。本文首先归纳了以上几类丢包识别的方法,在对比这些方法的基础上提出了该问题的研究方向。

## 2 基于端到端测量的识别

这类方法的决策依据是 TCP 层端到端测试的结果,由于与传统 TCP 思想相符,因此是研究得最多的一类方法。根据其实现的难易程度,我们分别就单测度、多测度和学习推理 3 类进行分析。

### 2.1 基于单个测度的方法

识别时可以按照拥塞丢包归类(Always Congested)、按照无线丢包归类(Always Wireless)或者随机归类 Random-LDA(Loss Differentiation Algorithms),前两者通过判断所有的拥塞丢包和误码丢包来进行识别,Random-LDA 则假设事先未知任何丢包类型,通过决策规则来推断丢包原因。端对端的测度有往返时延、单程时延、包间间隔、ACK 速率等等,其中较有影响的有:

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重大研究计划(90304010)。叶 进 博士研究生,主要研究方向为计算机网络;王建新 教授、博士生导师,主要研究方向为计算机网络。

基于往返时延的方法——NCPLD<sup>[3]</sup> (Non-congestion Packet Loss Detection)。将网络中最优输出点测量到的 RTT 称为延迟阈值(delay threshold)。如果当前测量到的 RTT 比延迟阈值要小,则认为丢包不是由于网络拥塞引起的;否则就认为丢包是由于拥塞引起的。为了提高延迟阈值的准确度,文[4]采用 EWMA 方法,在两个连续的 RTT 样本间估计差值来逼近 TCP 时钟粒度。尽管如此,当网络结构复杂性和动态性较高时,对延迟阈值估计会变得比较困难,因此该方法只适用于结构相对稳定的主干网。

基于包的到达间隔区分丢包的方法——TCP-Biaz<sup>[5]</sup>。设  $T_{min}$  为连接期间收方观测到的包到达时间间隔的最小值,  $P_i$  为丢包发生前收方收到的最后一个按序的包,  $P_{i+n+1}$  为丢包后到达的第一个失序的包 ( $n$  是丢包的数目),  $T_i$  为包  $P_i$  和  $P_{i+n+1}$  到达的间隔时间。如图 1 所示,假设所有包长度相等,如果  $(n+1)T_{min} < T_i < (n+2)T_{min}$ , 则  $n$  个丢失的包是无线传输错误,否则是拥塞引起的。



图 1 Biaz 机制

文[6]对该方法进行分析发现,无线信道越接近完全利用率, wireless loss 的上限应当越低,通过实验分析提出将该上限值调整为  $[(n+1.2) \sim (n+1.3)]$  可以在低拥塞误判和高吞吐量之间取得折中。

基于 ROTT 的方法——TCP-Spike<sup>[7]</sup>。由于拥塞的显著特征是缓冲区溢出,因此,对应的 ROTT(数据包从发端到收端的单程时延)表现为一个峰值的出现,如图 2 所示。收到一个序号为  $i$  的数据包,如果此连接不在当前峰值状态,而且该数据包的 ROTT 值超过阈值  $B_{spikestart}$ , 那么算法开始进入 spike 区间进行判别;相反,如果此连接在当前峰值状态,而且该数据包的 ROTT 值小于阈值  $B_{spikeend}$ , 那么算法离开 spike 区间进行判别。这样当收到的包序号发生缺失时,算法根据不同的区间进行分类, spike 区间的归为拥塞丢包,非 spike 区间的归为误码丢包。  $B_{spikestart}$ 、 $B_{spikeend}$  根据 ROTT 的极值来确定。

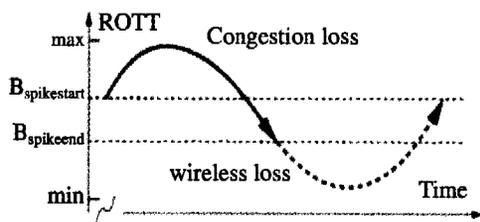


图 2 Spike 机制

在无线链路瓶颈上存在大量竞争流时,基于包到达间隔的 TCP-Biaz 方法容易将无线随机错误误判为拥塞,相反,基于 ROTT 的方法在大部分情形下能获得更准确的拥塞判断。因此文[6]提出的混合机制(TCP-BSZ)把上述两种 Always Wireless (Biaz 机制)、Always Congested(Spike 机制)方法结合起来,竞争流少时采用 Biaz 机制能够较好地随机丢包判别,竞争流多时采用 Spike 机制能够较好地拥塞丢包判别,进行连接和传输数据阶段则根据丢包的个数和 ROTT 当前值和平均值之间的差异性对两种丢包进行归类。

## 2.2 基于多个测度的方法

这些基于端到端的测量的方法的关键在于测量结果是否能够准确反映与丢失相关的特性,而这些测度各自能够反映其中的某些特性,因此进一步提高判断准确度的一种途径就是研究这些测度之间的相互关系,从而映射各种丢包的综合性。

例如,文[8]中就综合了 4 个指标来对丢包进行分类:IDD(包达到间隔)、STT(单位时间收到的包的数目)、POR(单位时间失序的包的数目)、PLR(单位时间丢包的数目),将这些测度的数值离散化为 high、mid、low 3 个值,然后根据它们中的异常值(high 和 low)对丢包进行分类:

- IDD&STT=(high, low), 对应 congestion 引起的丢包;
- POR=high, 对应 route-change 引起的丢包;
- PLR=high, 对应 channel-ERR 引起的丢包;
- STT≈0, 对应 disconnection 引起的丢包。

实际上这几个测度综合了网络的吞吐量、时延、丢包率等几个方面的特性,因此能够对丢包进行详细的区分。但这些区间的取值较难界定。

## 2.3 基于学习推理的方法

以上的方法都是基于某些测度的阈值判断,实际网络的状态是动态的,因此更为科学的方法是基于测度的变化状态建立学习模型,然后根据当前测量值在模型中进行推理,从而判断丢包的原因。贝叶斯和模糊逻辑就是其中的两种方法。

①Bayes 方法。基于 congestion loss 和 wireless loss 下的 RTT 采样建立条件概率状态的 HMM 模型,然后用 Bayes 方法对当前状态进行推理,得到丢包的原因,整个过程如图 3 所示。



图 3 基于 Bayes 的丢包识别

Ibrahim Matta 工作组首先提出了 TCP-Bayes 方法,他们研究了 RTT 的变化状态与丢包属性的相互关系,提出使用 filp-flop filter 来跟踪 RTT 的变化,并通过与历史数据的对比进行判断。在文[9]中他们引入了 Bayes 这种根据历史数据进行学习推理的工具,将丢包事件定义为  $T = \{congestion, wireless\}$  的二值集合,与每次丢包有关的 RTT 定义为一组随机变量的集合  $R \in R^+$ , 通过历史数据学习获得 T、R 之间的概率状态模型,从而构造了一个 T 集合的二值预测器。同时他们用排队论进行了理论分析,获得了与实验方法相似的结果,说明这种方法构造的预测器是可靠的。文[10]将该 TCP-bayes 方法加入传统的 TCP 机制中,在通用的 PMA 数据集和在线的 BU 数据集上进行使用,获得了大于 80% 的正确率和小于 20% 的误判率,是端到端测量中较为成功的一种方法。

②Fuzzy Logic 方法。与 Bayes 方法类似,Fuzzy Logic 也是一种不确定性推理的方法,它在输入集合和输出集合之间根据逻辑规则进行映射,所谓模糊逻辑并不是精确的函数映射,而是通过学习获得的离散化数值区间的一些对应关系。R. Oliveria 提出将该方法用于 TCP 错误检测,文[11]中将输入集合定义为  $\{t, \delta_i\}$ ,  $t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ ,  $\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t)^2$ , 分别表示

RTT 的均值和变化值,输出集合定义为{CO(Congestion), UC(Uncertain), BE(Bit Error)},学习得到的模糊逻辑见图 4,例如  $mean \in \{S\} \& variance \in \{L\}$  映射为 BE,相反只要  $mean \in \{L\}$  都映射为 CO。

Var\mean	S	M	L
S	BE	CO	CO
M	BE	UN	CO
L	BE	BE	CO

图 4 Fuzzy Logic 识别规则

任何测度在不同的网络环境下都存在不同的特性,因此使用统一的方法对丢包原因进行判断都存在可控性问题,基于某种网络的历史状态、通过学习推理进行判断的方法,是符合实际应用的需要的,这类方法的缺点是对预测器的训练要付出一定的代价。但由于 Bayes 方法和 Fuzzy Logic 方法所需训练样本较少,因此在网络状态推理中得到了较好的应用。

### 3 基于底层信息的识别

TCP 层的机制都只能在 Timeout 时才发现路由中断和随机误码等问题,其实在这些错误发生的底层更能够及时发现这些问题。这正是 TCP 优化的一个重要思想:利用相关层的信息进行跨层设计。

#### 3.1 基于网络层信息的方法

文[12]根据路由器的丢包规律来进行丢包识别。该方法使用一种简单的 BQM(Biased Queue Management)机制,在路由器中对队列中的数据包进行标记,按照区分服务中的标记算法分为 in 和 out 两种等级,当路由器缓存溢出时,标记为 out 的包由于优先级较低会被丢弃(biased dropping)。那么,接收方如果发现丢包的规律与之相匹配,就可以将丢包归因于网络拥塞,相反,如果路由器的丢包行为并不能体现标记的规律,而存在较大的随意性时,就可以将丢包归因于信道错误。文中进行丢包行为的分析使用了一个模式函数:  $F(x, r, k) = 1 - [k \cdot \frac{x}{r}]$ ,其中  $x$  是标记为 out 的丢包数日,  $r$  是一段 TCP 序列中丢包的总数,  $k$  是一个可调的匹配因子,与该段 TCP 序列中标记的模式相关。

#### 3.2 基于链路层信息的方法

文[13]首先在物理层测量信号强度,根据信号强度和节点距离之间的函数关系计算节点间的距离,当节点间距离超过了某一阈值,如果发送失败,就识别为路由中断导致的丢包;当节点间距离在一定范围内时发送失败,就认为丢包是随机误码造成的。根据底层反馈的信息,MAC 层决定是否坚持进行 RTS/CTS 请求,网络层则决定是否需要进行新的路由发现。

由于异构网中丢包的复杂性大大降低了网络性能的可控性,因此跨层的设计越来越受到关注,其思想是将链路容错度、误码率等信息通知高层,同时将端到端带宽、时延随信道变化的情况通知底层,让各层基于网络的变化特性进行性能优化。

### 4 基于显式反馈的方法

传统 TCP 在两种情况下会得知丢包:Timeout 和 DUPACK, TCP-Reno 中将收到 3 个重复的 ACK 视为已经丢包,因而丢包最简单的反馈机制就是发 3 个重复的 ACK,使源端

在超时前获得丢包的反馈信息。但这样一种简单通知已经丢包的方法,显然不能精确反映丢包识别的信息,因此许多研究提出了一些显式反馈方法。

#### 4.1 显式错误通告

ELN(Explicit Loss Notify)<sup>[14]</sup>:是由链路层将状态通知消息作为 TCP 选项捎带在 ACK 中,使发送方得知产生了非拥塞造成的丢包。

ELFN(Explicit Link Failure Notify)<sup>[15]</sup>:在多跳无线网络中 ELN 无法由链路层 ACK 带回源端,因此 G. Holland 提出了 ELFN 机制,它修改 DSR 路由由错误信息以携带一个类似“host unreachable”的数据包,包括目的端地址、源端地址、端口号和 TCP 序号。收到该错误信息后,源端将进入“stand by”状态,“冻结”数据发送并不断探测信道状态,直到收到 ACK 才结束该状态,恢复原来的数据发送。这类方法受到特定路由协议的限制,同时“冻结”状态的引入会降低网络的吞吐量。

#### 4.2 显式拥塞通告

ECN(Explicit Congestion Notify)<sup>[16]</sup>:S. Floyd etc 提出的一种重要方法,与 ELN、ELFN 的 Always Wireless 机制相反,它采用 Always Congestion 机制,是一种和主动式队列管理(Active Queue Management, AQM)机制结合使用的方法。在执行 AQM 机制的路由器中,当拥塞发生并且队列没有溢出时,对数据包按照一定的概率进行拥塞标记,接受端收到拥塞标记包后将此拥塞信息通过确认包传送到发送端,于是发送者激发拥塞控制机制。该方法的关键是如何根据路由器中的队列长度确定标记的概率,其中涉及到多个参数的估算,因此当这些参数设置不当将影响判断的准确性。

TCP-Jersey<sup>[17]</sup>:该方法通过路由器进行 CW(Congestion Warn)标记,当发送方收到有该标记的 DUPACK,表明这个 DUPACK 暗示的丢包很可能是由拥塞造成的,如果收到未标记的 DUPACK,则丢包更可能由传输错误引起的。标记的依据是有效带宽,当估算的有效带宽高于缓存容量的 1/N(N 是设置的阈值)时,路由器溢出的可能性较大,因此经过的包被打上 CW 标记。这种方法实际上是 ECN 机制的一种无概率标记,只要在 TCP 发送方做简单的配置就可以实现了,从而减少了参数的配置。

#### 4.3 显式拥塞和无线错误通告

M-Acks(Multiple Acknowledgements)<sup>[18]</sup>:它使用类型 ACK 包:ACKp 和 ACKc。前者通知源端数据已被基站正确接收,后者则是 TCP 中的正常确认包。如果源端收到序号为 s 的 ACKp 包,则说明基站难以发送 s 包,源端便更新 RTO 以避免端到端重传,并且标记此包。当超时发生时,源端检查数据包,如果是没有标记过的,则进入拥塞控制过程;否则不做任何拥塞处理而只是更新 TRO。

可见,显式反馈机制可以对丢包进行通知、识别和预警,在异构网中让端节点清楚网络的状态而“对症下药”。

### 5 其它方法

除了以上这些直接进行丢包识别的方法外,还有一些针对异构网中整体性能优化的方法,它们基于系统的测量结果采取不同的控制策略,实际上是把丢包识别的规则隐含全局控制里面。例如:

1. 基于有效带宽控制的 TCP-Westwood<sup>[19]</sup>。其关键是通过监测返回 ACK 速率来持续测量有效带宽,并用当前有效带宽估算拥塞窗口和慢启动门限值。与在发生拥塞时盲目

执行乘性减少拥塞窗口的方法不同, TCPW 通过适应性设置与有效带宽一致的参数值, 显著地提高了吞吐量。该方法的瓶颈在于 ACK 到达的时延和累积效应使得带宽估计的准确性受到影响。

2. 基于 IP 头部反馈控制的 XCP (eXplicit Control Protocol)<sup>[20]</sup>。在 IP 头部添加了如图 4 所示的信息。

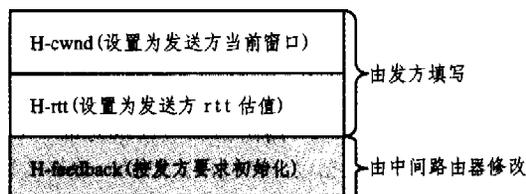


图 4 XCP 使用的拥塞头部

基于这种 IP 包结构, XCP 首先让发方探测网络中的拥

塞节点, 并将其拥塞的程度通过 H-feedback 反馈回来, 然后源方根据反馈时延调整发送速率。

3. 基于负载因子控制的 VCP (Variable-structure congestion Control Protocol)<sup>[21]</sup>。利用现有 ECN 的两个 bit 位来反馈拥塞情况。具体做法是, 首先由每个路由器周期性估算其输出链路  $l$  上的负载因子, 然后将该值划分为 Low-load、High-load、Overload 三个区间, 用 2-bit ECN 位编码后由 ACK 包从收方送回发方; 最后根据收到的负载因子的等级, 发方执行不同的控制算法。

以上 3 类典型方法都能够快速响应网络的状态变化, 因此能够预防和减少异构网中的丢包。

**结论和展望** 本文针对异构网中丢包变得复杂和难以控制的问题, 分析了目前进行丢包识别的方法, 表 1 从识别的依据、结果的反馈和相应的处理三个环节对以上一些典型的方法进行了比较。

表 1 丢包识别方法

方法	依据	反馈	处理	功能实现	适用网络
NPLD	Delay threshold	Congestion	Cwnd/2	源节点	无线主干网
TCP-BSZ	Packet Interval /ROTT	Wireless/Congestion	Congestion; Cwnd/2	源节点	最后一跳是无线链路的网络
TCP-Bayes	RTT State	Wireless/Congestion	Congestion; Cwnd/2	源节点	有线/无线主干网络
ECN	Queue length	Congestion Warn	按概率标记丢包	中间路由器	广泛
TCP-Jersey	EBE	Congestion Warn	标记丢包	中间路由器	广泛
TCP-Westwood	Rate of ACK	Available Bandwidth	Ssthresh = (BWE * RTTmin) / seg-size	源节点	高速、无线/有线混合网络
XCP	RTT Queue length	H-Feedback (拥塞程度)	Cwnd = max(Cwnd + H-feedback; s) S 为一个包的大小	中间路由器 源节点	广泛
VCP	Queue Rate Link Utilization	Load Factor (负载因子)	Lowload; M1 Highload; A1 Overload; MD	源节点	广泛

根据前面的分析我们可以看到:

①基于端到端测量的方法依赖于测量的精度, 而在结构复杂的异构网中难以保证测量的精度。拥塞丢包是一个全局性的问题, 其判断处理策略主要在 TCP 层是合理的, 而无线丢包是无线链路上特有的问题, 应对的策略放在底层是更为合理的。由于物理层的差异性较大, MAC 层相应的特征属性应作为进一步研究的重点。

②对减少异构网中的丢包应当采用系统的方法。文[22]提出了适用于所有 IP 网络错误诊断的工具 Shrink (Shared Risk Link), 它首先把物理层和 IP 层建立关联映射图, 然后在结构图推理发生错误的节点和链路。但原有的 MinSet-Cover 和 BayesNet 两种推理方法, 由于映射图的规模较大, 结构复杂, 是一个 NP 难问题, Shrink 工具将其时间复杂度简为  $O(n^4)$  的多项式, 从而使得这个工具具备了高效性和可行性。可见, 综合 TCP 层、IP 层、LINK 层的信息, 建立错误检测、反馈和处理的系统模型, 是今后提高异构网络性能的关键。

③研究新的体系结构, 根本上提高异构网的性能。由于网络的构成日趋复杂, 低空卫星网络, RF 网络、传感器网络等将参与 Internet 的连接, 它们的物理链路会频繁甚至周期性地断开, 因此新的网络体系结构必须是一个容错的网络, Delay-Tolerant Network<sup>[23]</sup> 试图改变原来“打补丁”的这些方法,

而提出一种 overlay 的结构, 它工作在现有不同结构的协议栈之上, 通过 DNT 网关对不同类型的子网进行连接。这种 overlay 结构可以提取子网的信息摘要, 从而“心中有数”地进行集中转发。

作为提高网络可控性的关键, 丢包识别是一个值得深入研究的课题。面对未来日益复杂的网络环境和性能要求, 只有系统的解决方案, 才能对丢包进行良好的控制。

### 参考文献

- 1 Barakat C, Altman E, Dabbous W. On TCP Performance in a Heterogeneous Network; A Survey 2004. <http://www2.univ-reunion.fr/~panelli/enseignement/TRA/documentation/Barakat01.pdf>
- 2 冯彦君, 等. MANET 中 TCP 改进研究综述. 软件学报, 2005, 16(3): 434~444
- 3 Samaraweera N K G. Non-Congestion Packet Loss Detection for TCP Error Recovery using Wireless Links. IEE Proceedings Communications, 1999, 146(4)
- 4 Bregni S, Martignon D C. Enhanced Loss Differentiation Algorithms for Use in TCP Sources over Heterogeneous Wireless Networks. Globecom, 2003

(下转第 33 页)

在图3中,LBB-AODV比AODV在路由开销方面减少至14.8%。这主要由于不断转发的RREQ在AODV的路由分组中占了90%<sup>[4]</sup>,而在LBB-AODV和TLBB-AODV中过载的中间节点直接丢弃RREQ,极大地减少了网络路由开销。同时,由于LBB-AODV和TLBB-AODV的分组传送率比AODV高,相同情况下目的节点接收到更多的分组,所以网络归一化开销较小。从图中可以看出,当网络负载增加时,两个协议的归一化路由开销都减少,这是因为信源可以利用发现的路由发送更多的数据分组。

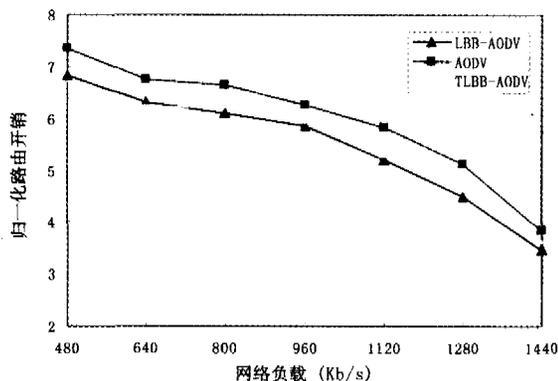


图3 归一化路由开销随网络负载变化曲线

**总结** 本文在AODV基础上提出了一个基于负载均衡的MANET路由协议。根据本地带宽状态,每个节点选择是否转发RREQ,从而避免网络拥塞并减少RREQ风暴。同时,每个RREQ都记录它所经过路径的带宽时延信息,由目的节点选择最佳路由。论文还提出了一个简单而有效的带宽估计模型。

仿真显示LBB-AODV和TLBB-AODV在高业务量的情况下,分组传送率、平均端到端时延和路由开销等性能较AODV有显著提高。由于LBB-AODV协议基于路径节点的剩余带宽来选择路由,避免了负荷较重的节点成为中间节点,因而增强了所选路径的稳定性,减少了网络拥塞程度。TLBB-AODV同时又考虑了时延的因素,所以在平均端到端时延性能上较LBB-AODV有所提高。

今后的工作主要是将LBB-AODV和TLBB-AODV与其它负载均衡协议<sup>[11,12]</sup>仿真对比,分析结果,并研究带宽估计模型的参数对协议性能的影响,进一步提高其性能。

### 参考文献

- 1 Mobile Ad-hoc Networks (MANET). <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- 2 Perkins C, Royer E. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV). July 2003. RFC 3561
- 3 Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile Comput*, 1996;153~181
- 4 Perkins C, Royer E, Das S, et al. Performance comparison of two on-demand routing protocols for Ad hoc networks. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8 (1): 16~28
- 5 Perkins D D, Hughes H D, Owen C B. Factors affecting the performance of ad hoc networks. *Communications*, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference, 2002, 4:2048~2052
- 6 Zhong Xiaofeng, Wang Youzheng, Mi Shunliang, et al. An Experimental Performance Study of Wireless ad hoc System Utilizing 802.11a Standard Base on different Routing Protocols. *Asia Pacific Optical and Wireless Communications*, October 2002
- 7 Zhang Linfang, Zhao Zenghua, Shu Yantai, et al. Load balancing of multipath source routing in ad hoc networks. *Communications*, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on Volume 5, Page(s): 2002,5,3197~3201
- 8 Pham P, Perreau S. Multi-path routing protocol with load balancing policy in mobile ad hoc network. *IFIP Int'l Conference on Mobile and Wireless Communications Networks*, Sept. 2002
- 9 Nasipuri A, Castaneda R, Das S. Performance of multipath routing for on-demand protocols in ad hoc networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET) Journal*, 2001, 6 (4):339~349
- 10 Ganjali Y, Keshavarzian A. Load balancing in ad hoc networks: single-path routing vs. multi-path routing. *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2004, 2: 1120~1125
- 11 Lee S J, Gerla M. Dynamic load-aware routing in ad hoc networks. *Communications*, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on 2001, 10:3206~3210
- 12 Lee Y J, Riley G F. A workload-based adaptive load-balancing technique for mobile ad hoc networks. *Wireless Communications and Networking Conference*, 2005 IEEE 2005, 4:2002~2007
- 13 Mohapatra P, Li J, Gui C. QoS in mobile ad hoc networks. *IEEE Wireless Commun Mag (Special Issue on QoS in Next-Generation Wireless Multimedia Communications Systems)*, 2003, 44~52
- 14 Zhang Liang, Shu Yantai, Liund Y, et al. Adaptive Tuning of Distributed Coordination Function (DCF) in the IEEE 802.11 to Achieve Efficient Channel utilization. *Future Telecommunication Conference 2003*. Beijing, China, Dec 2003
- 15 Network Simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- 16 Zhao Liqiang, Wang Xin, Lim Azman Osman, et al. A Load Balance Based On-Demand Routing Protocol for Mobile Ad-Hoc Networks. *International Conference on Computational Science (4)*, 2006, 9~16

(上接第22页)

- 5 Biaz S, Vaidya N. Discriminating congestion losses from wireless losses using interarrival times at the receiver. In: *Proc IEEE Symp Application-Specific Systems and Software Engineering and Technology*, Richardson, TX, Mar 1999, 10~17
- 6 Cen Song, Cosman P C, Voelker G M. End-to-End Differentiation of Congestion and Wireless Losses. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(5)
- 7 Tobe Y, Tamura Y, Molano A, et al. Achieving moderate fairness for UDP flows by path-status classification. In: *Proc 25th Annu IEEE Conf Local Computer Networks (LCN 2000)*, Tampa, FL, Nov 2000, 252~261
- 8 Fu Zhenghua, Greenstein B, Meng Xiaoqiao, et al. Design and Implementation of TCP-Friendly Transport Protocol for Ad Hoc Wireless Networks. *ICNP*, 2002
- 9 Liu Jun, Matta I B. End to End Inference of Loss Nature in a Hybrid Wired/wireless Networks. In: *Proceedings of WiOpt*, 2003
- 10 Fonseca N, Crovella M. Bayesian Packet Loss Detection for TCP. *Inforcom*, 2005
- 11 de Oliveira R, Braun T. A Delay-based Approach Using Fuzzy Logic to Improve TCP Error Detection in Ad Hoc Networks. *WCNC*, 2004
- 12 Biaz S, Vaidya N H. De-Randomizing Congestion Losses to Improve TCP Performance Over Wired-Wireless Networks. *IEEE/*

- ACM Transactions on Networking, 2005, 13(3)
- 13 Klemm F, Ye Zhengqiang, Krishnamurthy S V. Improving TCP Performance in Ad Hoc Networking Using Signal Strangth Based Link Management. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3:175~191
- 14 Balakrishnan H, Katz R. Explicit loss notification and wireless web performances. *Mobecom'98*
- 15 Holland G, Vaidya N. Analysis of TCP Performance over Mobile Ad Hoc Networks. *ACM MOBICOM*, 1999
- 16 <http://www.icir.org/floyd/ecn.html>
- 17 Xu Kai, Tian Ye, Ansari N. TCP-Jersey for Wireless IP Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(4)
- 18 Biaz S, Vaidya N, et al. TCP over wireless networks using multiple acknowledgment. [Technical Report], 97-001. Texas A & M University, January 1997
- 19 TCP Westwood Home Page. <http://www.cs.ucla.edu/NRL/hpi/tcpw/index.html>
- 20 Katabi D, Hanley M, Rohrs C. Congestion Control for High Bandwidth-Delay Product Networks. *SIGCOMM'02*
- 21 Xia Yong, Subramanian L, et al. One More Bit is Enough. *SIGCOMM*, 2005
- 22 Kandula S, Katabi D, Vasseur J-P. Shrink: A Tool for Failure Diagnosis in IP Networks. *SIGCOMM*, 2005
- 23 Fall K. A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets. *IRB-TR-03-003*, Feb 2003