

基于广义误码率的 MANET 流媒体传输 端到端速率控制理论和方法

朱晓亮^{1),2)} 杨宗凯¹⁾ 杜 旭¹⁾ 程文青¹⁾

¹⁾(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

²⁾(华中师范大学教育信息技术工程研究中心 武汉 430079)

摘 要 针对移动自组织网络(Mobile Ad hoc Networks, MANET)的特点和 IEEE802.11 的链路层重传机制和分包策略的不足,研究基于广义误码率(Generalized Bit Error Ratio, GBER)和参考无线包重传概率(Packet Retransmission Ratio, PRR)的时延约束方程理论和传输层包长调整方法,并设计基于时延约束的 MANET 流媒体传输可变包长 TCP 友好速率控制机制(Variable Packet size TCP-Friendly Rate Control, VPTFRC). 与其他方案不同,该机制进一步考虑了无线包重传概率对于包长调整和 TCP 友好速率控制机制的影响,给出了这一机制的理论模型与相关计算的详细说明,仿真试验的结果验证了该方法在有效吞吐量、传输延时及抖动和 TCP 友好性方面优于 TFRC 协议.

关键词 移动自组织网络; IEEE802.11; 流媒体; TCP 友好速率控制; 链路层重传

中图法分类号 TP393

Generalized BER Based Theory and Methodology of End-to-End Rate Control for MANET Streaming Media Transmission

ZHU Xiao-Liang^{1),2)} YANG Zong-Kai¹⁾ DU Xu¹⁾ CHENG Wen-Qing¹⁾

¹⁾(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

²⁾(Engineering Research Center for Education Information Technology, Huazhong Normal University, Wuhan 430079)

Abstract In consideration of features of MANET(Mobile Ad hoc Networks) and shortages of retransmission and packet fragment strategies in link layer based on IEEE 802.11, this paper researches on the theory of delay-constrained equation and the policy of packet-size adjustment in transport layer according to Generalized Bit Error Ratio(GBER) and wireless Packet Retransmission Ratio(PRR). A Variable Packet size TCP-Friendly Rate Control(VPTFRC) scheme for streaming media transmission over MANET based on the theory is proposed. Unlike other proposals, this mechanism takes the impact of wireless PRR on the packet-size adjustment and TFRC performance into consideration. The theoretical model and relevant detailed deduction are also presented. Simulation results demonstrate the proposed mechanism can simultaneously achieve higher goodput, better TCP fairness, shorter transmission delay and less jitter than TFRC protocol.

Keywords MANET; IEEE 802.11; streaming media; TCP-friendly rate control; link layer retransmission

收稿日期:2005-10-13;修改稿收到日期:2007-05-17. 本课题得到国家自然科学基金(60302004)、湖北省自然科学基金(2005ABA264)和高等学校博士学科点专项科研基金(20050511002)资助. 朱晓亮,男,1975年生,博士,研究方向为无线流媒体传输和编码技术. E-mail: zhuxlhust@yahoo.com.cn. 杨宗凯,男,1963年生,教授,博士生导师,研究领域为下一代互联网等. 杜 旭,男,1970年生,博士,副教授,研究方向为流媒体技术和网络缓存. 程文青,1963年生,博士,教授,研究领域为移动自组织网络和传感器网络.

1 引言

MANET 具有高生存能力和灵活性,可应用于不易建设固定通信设施的环境,它是一种由移动节点组成的自组织的无线网络,每个节点同时具有终端和路由器两者的功能^[1]. 当前研究已逐步将 MANET 定位为灵活、低代价的有线网络的扩充,即作为一种用户接入 Internet 的手段,从而构建适合商用的无线接入网络,使得用户能够通过接入点接入有线网络并采用多跳的传输方式来上传(针对有线网络而言)或者下载数据,如麻省理工学院提出的 Roofnet^[2]和南加州大学洛杉矶分校提出的 H2O (Home-to-home Online)^[3]等试验网络. 这些研究为无线流媒体业务的推广奠定了基础,同时也带来新的挑战^[4]. 不同于传统数据和语音业务,流媒体业务通常具有连续、平稳的高带宽需求,且对时延及其抖动、丢包率等也有较严格限制,因此 MANET 流媒体传输机制必须能够提供适应多跳无线链路高传输误码、时变等信道特征的服务质量(Quality of Service, QoS)自适应传输速率;此外,其实时性要求决定一般采用 UDP 组包传输,但 UDP 不具备速率控制能力,这使得 MANET 接入有线网络时流媒体与占统治地位的 TCP 流量可能发生恶性竞争,因此 MANET 流媒体传输还需具备 TCP 友好性^[5-6]. 现有的速率控制策略包括基于网络和端到端两类. 通常,基于网络的方法目标是控制网络拥塞状况,这类方法又可分为链路层和网络层控制两类,然而其需要修改现有网络结构或协议,因此,端到端的机制成为首选^[6]. 该机制一般运行在发送端和接收端,通过反馈机制来达到拥塞避免的目的,TFRC 就是其中的一种,在有线网络中已证明该类机制具有良好的 TCP 友好性能和拥塞避免能力^[7],但应用于无线链路时由于高误码率等非拥塞因素造成的包丢失引发错误的拥塞控制,这导致性能下降^[6]. 针对以上问题学术界提出了众多方案. 一类是关注改善无线链路 TFRC 的吞吐量,提高信道利用率^[6,8-9],然而其仍面临信道利用不足、QoS 下降或复杂度较大等问题. 另一类是结合抗无线链路错误方法如前向纠错(Forward Error Correction, FEC)、多描述符编码(Multiple Description Coding, MDC)、重传机制等改善丢包率等指标^[10]. IEEE 802.11 采用链路层重传机制降低丢包率,但其增加了延时,为降低重传时延和丢包率,采用分包策略,即通过误码升高时减小

包长的方法来降低包重传概率和时延,然而其仍存在以下不足:(1)若某小包超过最大重传次数,则整个原始包都将被丢弃;(2)由原始包分解成的所有小包传输完以前不能传输其它的包,从而可能导致传输某包的时间超长而影响了其它包的传输;(3)缺乏分包上限的动态调整机制,不能适应无线链路信号质量变化较大的环境^[11]. 此外,张占军提出参考误码率的无线信道 QoS 自适应模型,但由于误码率统计困难、误差较大等问题影响其操作性,该方法不易移植至多跳网络,同时不具备 TCP 友好性^[12]. 综合以上研究发现目前无线流媒体传输速率控制机制难以兼顾 QoS 和 TCP 友好性要求.

本文所作的主要工作是参考以上研究的成功经验和我们的前期工作^[13],着重分析融合现有链路层重传机制的时延约束理论,引入广义误码率概念,将参考误码率的时延约束方程^[12]推广至多跳 MANET,并建立新的参考无线包重传概率的满足最小重传时延约束的传输层包长调整方程和实现方法;同时提出基于无线包重传概率的速率折扣方法以减轻链路层排队时延,最终建立适合 MANET 流媒体传输的 QoS 自适应和 TCP 友好速率调整机制. 该机制结合链路层重传机制可有效地改善流媒体帧端到端传输时延及其抖动和丢包率等 QoS 指标. 本文在分析了 MANET 流媒体传输模型和端到端速率控制的需求和基本原则的基础上,第 2 节给出参考无线错误事件的时延约束方程;第 3 节给出实用的速率控制机制;第 4 节给出 NS2.26 环境下的仿真实验和结果比较及分析;第 5 节对全文进行总结.

2 系统模型描述和问题分析

MANET 接入模型由位于有线链路的服务器、网关和无线节点组成(如图 1 所示),其中无线节点通过 n 跳 MANET 与网关接入有线网络. 本模型假定每个 MANET 节点间误码率相等,采用的数据包长相同,此外考虑到 RTS(Request To Send)、CTS(Clear To Send)和 ACK 包长均远小于数据包,这里仅分析数据包的发送情况.



图 1 MANET 接入模型

首先引入两个基本概念:无线链路广义误码率和无线端到端包重传概率. 为了描述 IEEE 802.11 链路层重传机制的包重传事件,假定 n 表示跳数, A

表示数据包传输次数上限, P_e 表示每跳的包错误率, 则描述包通过 n 跳无线链路的分析模型可简化为一多层有限马尔可夫链(如图 2 所示). 图 2 中, 状态 (i, j) 表示包经过第 i 个节点并已在 $i-1$ 跳发送 j 次, 且 $0 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq A$; 状态概率表示为 $p(i, j)$;

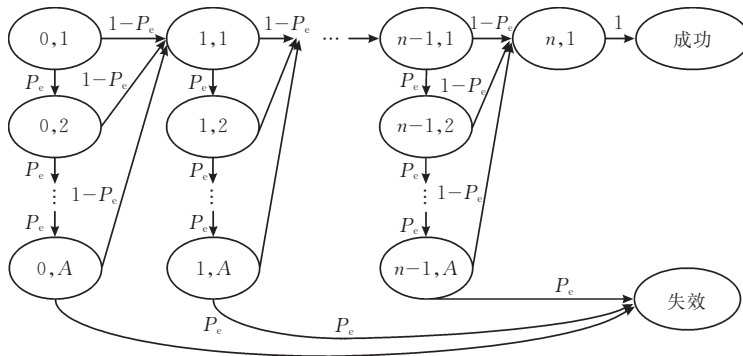


图 2 n 跳无线链路包传输多层有限马尔可夫链

假定端到端重传由“广义”误码率引起(无论是源于冲突或链路误码), 定义每跳的广义误码率为 $GBER$, 则 $P_e = 1 - (1 - GBER)^{S+H}$, 而端到端包重传概率

$$PRR = 1 - (1 - GBER)^{n \times (S+H)} \quad (2)$$

其中, S 表示包长, H 表示包头大小(包括 TFRC/UDP/IP/MAC/PHY 头), 由上式得到广义误码率

$$GBER = 1 - (1 - PRR)^{\frac{1}{n \times (S+H)}} \quad (3)$$

其次, 考虑到影响 MANET 接入流媒体传输 QoS 的主要因素是拥塞丢包和无线错误事件, 前者主要造成丢包和时延增加; 后者可通过链路层重传机制来降低其影响, 但增加了延时, 而且重传次数超过上限时会带来丢包, 为消除拥塞丢包的影响, 兼顾 TCP 友好性, 常采用 TFRC 机制, 该机制通过网络环回时间(Round Trip Time, RTT)、重传定时器时间(Retransmission TimeOut, RTO)和丢包率(Packet Loss Ratio, PLR)估计来探测可用带宽. 其方程描述为^[7]

$$R_{est} = (8 \times S) \left/ \left[RTT \times \sqrt{\frac{2PLR}{3}} + RTO \times \left(3 \sqrt{\frac{3PLR}{8}} \right) \times PLR \times (1 + 32PLR^2) \right] \right. \quad (4)$$

式中 R_{est} 为估计发送速率(单位: bps); S 单位为字节; RTT 、 RTO 单位均为秒. 现有 TFRC 算法常采用固定包长调整发包速率方法. 结合链路层重传机制可提高 TFRC 机制抗误码能力, 但并未考虑延时因素. 因此, MANET 端到端速率控制研究的主要任务是实现能够有效降低传输时延的结合链路层重传机制和 TFRC 的速率控制方法.

若状态转移概率为 $1 - P_e$, 则表示该包可直接通过该跳, 否则包被阻塞并重传(若超过最大重传次数, 则包被丢弃). 由图 2 得到包的端到端重传概率

$$PRR = 1 - \prod_{i=0}^{n-1} p(i, 1) \times (1 - P_e) \quad (1)$$

流媒体端到端传输时延主要包括有线/无线链路信号传播时延、发送时延、发送/接收及中间节点处理时延等. 对于端到端速率控制而言, 仅后两者为可控时延. 在数据量无明显变化且无拥塞的前提下处理时延变化不大, 因此主要考虑调整发送时延. 通常, 采用链路层重传机制时发送时延很大程度上取决于重传次数和单次重传时延两方面. 其中前者统计特征可由包重传概率反映, 而后者与包长有关, 当采用小包长时可有效降低该时延, 同时小包长传输时包错误率下降, 进而重传次数下降. 可见, 采用包长调整的方法可降低传输时延和包重传概率, 而且能够有效提高 IEEE 802.11 能效^[14]. 考虑到 IEEE 802.11 分包机制的不足, 采用传输层包长调整策略, 将 MANET 流媒体传输速率控制问题归结为结合无线错误和拥塞丢包事件的发包速率、包长的综合调整, 具体原则是首先根据 TFRC 方程, 将拥塞事件作为速率调整的基础, 然后将无线错误事件作为包长调整的基础, 最终由发送速率和包长确定发包速率.

3 参考无线错误事件的时延约束方程

定理 1. 假定包头大小为 H (单位比特), 流媒体数据包在跳数为 n 、带宽为 BW (bps)、单跳广义误码率为 $GBER$ 的理想高斯无线链路中保证无差错传输的最小延时的最优发送包长为

$$S^* = -2 \left/ \left[n \times \ln(1 - GBER) \times \right. \right.$$

$$\left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{n \times H \times \ln(1 - GBER)}}\right) \quad (5)$$

证明. K 位数据包在误码率为分别为 $GBER_1, GBER_2, \dots, GBER_n$ 的 n 跳理想高斯无线信道上传输时无差错概率为

$$P_s = (1 - GBER_1)^K \times (1 - GBER_2)^K \times \dots \times (1 - GBER_n)^K \quad (6)$$

简化起见, 设定 $GBER_1 = GBER_2 = \dots = GBER_n = GBER$, 则

$$P_s = (1 - GBER)^{n \times K} \quad (7)$$

假设流媒体帧尺寸为 I 位, 被拆分成 F 个包传输, 于是每个包尺寸为 $S = I/F$, 包头尺寸为 H , 则每个包长为 $K = I/F + H$, 则 I 位多媒体帧的包无差错传输成功概率为

$$P_s = (1 - GBER)^{n \times (I/F + H)} \quad (8)$$

若当前传输包的重传次数与其它的包重传次数不相关, 设第 i 个包重传次数为 N_i , 则序列 $\{N_i\}$ 为一独立同分布随机变量, 第 $N_i = k$ 次重传成功的概率等于前 $k-1$ 次包重传未成功时的条件概率, 表示为

$$P[N_i = k] = (1 - P_s)^{k-1} \times P_s,$$

则 N_i 的期望

$$\bar{N} = \sum_k k \times P(k) = \sum_k k \times (1 - P_s)^{k-1} \times P_s = \frac{1}{P_s} \quad (9)$$

上式表示每个包平均传输 \bar{N} 次成功. 假设每个包的端到端延迟为 d , 则^[12]

$$d = \frac{I/F + H}{BW} \quad (10)$$

则 I 位多媒体帧的无差错传输的平均时延为

$$D = F \times d \times \bar{N} = \frac{F \times d}{P_s} \quad (11)$$

为求得最小时延, 求 D 对 F 的导数^[12]

$$\frac{\partial D}{\partial F} = \frac{1}{BW} \times$$

$$\frac{H + (I + H \times F) \times \ln(1 - GBER) \times n \times I \times \frac{1}{F^2}}{(1 - GBER)^{n \times (\frac{I}{F} + H)}},$$

令其等于 0, 则

$$\begin{aligned} H &= -(I + H \times F) \times \ln(1 - GBER) \times n \times I / F^2 \\ &\Rightarrow H \times F^2 + n \times I^2 \times \ln(1 - GBER) + \\ &\quad n \times I \times H \times F \times \ln(1 - GBER) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

解方程并取正值得到最佳包数

$$F^* = -\frac{I}{2} \times \ln(1 - GBER) \times \left[n + \sqrt{n^2 - \frac{4 \times n}{H \times \ln(1 - GBER)}} \right]$$

$$= -\frac{I \times n \times \ln(1 - GBER)}{2} \times \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4}{H \times n \times \ln(1 - GBER)}} \right] \quad (13)$$

因此最佳包长

$$S^* = \frac{I}{F^*} = -2 \sqrt{\left[n \times \ln(1 - GBER) \times \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{H \times n \times \ln(1 - GBER)}} \right) \right]}$$

最小端到端帧延迟

$$D^* = \frac{I}{(1 - GBER)^{n \times (S^* + H)}} \times \frac{1 + H/S^*}{BW} \quad (14)$$

得证.

证毕.

式(14)和式(5)、(13)分别表示保证 I 位流媒体帧可靠传输的最小时延及其对应的最佳包长和最佳组包数目. 式(5)称为时延约束方程, 即满足无线网络状况下传输时延最小的包长约束方程. 由定理 1 得到以下结论: 在保证可靠传输的前提下, 最佳包长决定于信道广义误码特性, 而传输时延与包长和误码率相关. 换言之, 为了保证最小传输时延, 包长必须与信道广义误码特性相适应. 但直接统计 GBER 值较困难, 考虑到包重传概率反映了广义误码事件, 且其可较容易地通过设置 MAC 层重传标志来进行统计, 因此采用其来估计广义误码率.

推论 1. 若理想高斯无线链路传输的端到端包重传概率为 PRR , 则第 i 个调整时刻保证最小无差错传输时延的最优包长的估计值为

$$S_i = -\frac{2 \times K_{i-1}}{\ln(1 - PRR_{i-1}) \times \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \times K_{i-1}}{H \times \ln(1 - PRR_{i-1})}} \right]} \quad (15)$$

其中 K_{i-1} 表示第 $i-1$ 个调整时刻的总包长.

证明. 根据包大小和包头大小, 第 $i-1$ 个调整时刻端到端包重传概率为

$$\begin{aligned} PRR_{i-1} &= 1 - (1 - GBER_{i-1})^{n \times (S_{i-1} + H)} \\ &\Rightarrow n \times \ln(1 - GBER_{i-1}) \\ &= \frac{1}{S_{i-1} + H} \times \ln(1 - PRR_{i-1}) \end{aligned} \quad (16)$$

代入式(5), 得到

$$S_i = -\frac{2 \times (S_{i-1} + H)}{\ln(1 - PRR_{i-1}) \times \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \times (S_{i-1} + H)}{H \times \ln(1 - PRR_{i-1})}} \right]} \quad (17)$$

令 $K_{i-1}=S_{i-1}+H$, 则得到包长的置换公式(15).

证毕.

定理 2. 若广义误码率有界, 且 $0<GBER_{\min}\leq GBER\leq GBER_{\max}<1$, 跳数 n 、包头 H 一定, 则式(15)收敛.

证明. 由式(16), $\ln(1-GBER_{\max})\leq\ln(1-GBER)\leq\ln(1-GBER_{\min})$, 则 $C_0\leq\frac{\ln(1-PRR)}{S+H}\leq C_1<0$, 其中 $C_0=n\times\ln(1-GBER_{\max})$, $C_1=n\times\ln(1-GBER_{\min})$. 由 $C_0\leq C_1<0$, 则最优包长 S 满足

$$S_{\min}=-\frac{2}{C_0\times\left[1+\sqrt{1-\frac{4}{H\times C_0}}\right]}\leq S$$
$$\leq-\frac{2}{C_1\times\left[1+\sqrt{1-\frac{4}{H\times C_1}}\right]}=S_{\max}\quad(18)$$

即 S 有界, 而且由以上分析得到当 $GBER_1>GBER_2$ 时, 有 $S_1<S_2$, 则式(15)单调降低, 故其收敛. 证毕.

若初始包长为 1000 字节、包头 H 为 134 字节, 最大传输单元(Maximum Transmission Unit, MTU)为 1500 字节. 图 3 给出了 $GBER$ 设置为 $10^{-8}\sim10^{-4}$ 时的最优包长理论结果(若包长大于 MTU , 则取最大值 $MTU-H$ 字节). 图 4 给出了流媒体帧长为 3000 字节、带宽为 1Mbps 时最优包长传输相对于固定包长方法端到端可靠传输延迟降低比例.

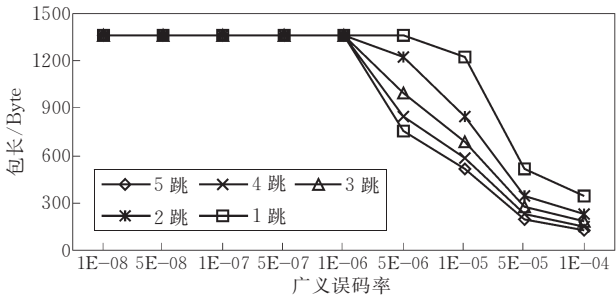


图 3 不同误码率设置、不同跳数时最优包长理论结果

如图 3 所示, 在低误码率范围内($10^{-8}\sim10^{-6}$)包长基本保持不变, 即此时等同于 TFRC, 而在较高误码率($10^{-6}\sim10^{-4}$)时不同跳数的最优包长值差别较大, 其中较少跳数的值大于多跳数情况. 这与事实相符, 因为多跳数时包错误重传概率相对增加, 可见根据包长约束方程可以实现根据误码率设置时的自适应包长调整. 如图 4 所示, 采用最优包长可有效地降低理论帧可靠传输时延, 且跳数愈多、误码率愈高, 效果愈明显, 在后续试验中将主要分析高误码率时的性能(暂取误码率 $10^{-5}\sim10^{-4}$). IEEE802.11 对于出错重传次数进行了限制(通常为 4 次), 这样最大的传输时延受限于该门限. 以上分析说明通过

变包长策略可有效适应多跳无线信道特征. 但是, 包长调小时必定使得包头开销增加. 为了定量评估包头开销的影响, 定义总传输字节中除有效传输数据字节外的部分所占用的比例为总传输消耗, 设为 ϵ . 并设数据传输消耗为 ϵ_1 和包头传输消耗为 ϵ_2 , 则得到

$$\epsilon_1=\frac{(\bar{N}-1)\times S}{\bar{N}\times(S+H)}\quad(19)$$

$$\epsilon_2=\frac{H}{S+H}\quad(20)$$

$$\epsilon=\epsilon_1+\epsilon_2\quad(21)$$

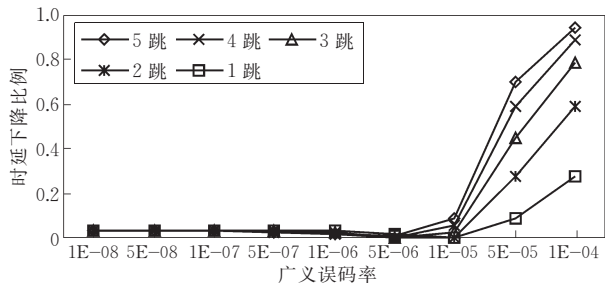


图 4 可靠传输端到端帧延迟传输时延降低比例

表 1 给出了采用上述相同的设置条件下不同跳数 n 和 $GBER$ 条件下得到的传输消耗比较结果(均采用百分比表示). 其中, 方法 1 表示最优包长方法; 方法 2 表示固定包长的方法; ρ_ϵ 表示总传输消耗的改善比例. 表 1 验证了最优包长方法由于采用了较小包长传输, 使得其在较高误码时相对于固定包长的方法增大了包头开销. 但是总体而言, 在不同的环境设置条件下, 采用最优包长方法使得总传输消耗均获得了较好的改善, 这归因于较小包长的较好的抗误码能力, 使得包重传次数降低, 从而降低了传输消耗. 并且, 随 $GBER$ 增大, 在相同跳数下传输消耗的改善比例并不一定单调增加, 这说明了包头开销对于传输消耗的影响规律较为复杂.

表 1 传输消耗比较

<i>n</i>	<i>GBER</i>	$\epsilon/\%$		$\epsilon_2/\%$		$\rho_\epsilon/\%$
		方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	
1	10^{-5}	19.1	19.5	9.8	11.8	2.1
	5×10^{-5}	38.8	44.0	20.6	11.8	11.8
	10^{-4}	51.0	64.4	27.8	11.8	20.8
2	10^{-5}	26.2	26.5	13.6	11.8	1.1
	5×10^{-5}	51.0	64.4	27.8	11.8	20.8
	10^{-4}	64.7	85.6	36.8	11.8	20.9
3	10^{-5}	31.3	32.8	16.4	11.8	4.6
	5×10^{-5}	58.8	77.4	32.9	11.8	24.0
	10^{-4}	73.0	94.2	42.9	11.8	22.5
4	10^{-5}	35.4	38.7	18.7	11.8	8.5
	5×10^{-5}	64.7	85.6	36.8	11.8	24.4
	10^{-4}	78.7	97.7	47.5	11.8	19.5
5	10^{-5}	38.8	44.0	20.6	11.8	11.8
	5×10^{-5}	69.3	90.9	40.1	11.8	23.8
	10^{-4}	82.9	99.1	51.2	11.8	16.4

4 基于可变包长的端到端 TCP 友好速率控制机制

根据式(1),式(12)建立基于可变包长的 TCP 友好速率控制(VPTFRC)机制.该机制包括了运行于内容服务器或代理上的 VPTFRC 源端和运行于客户端的 VPTFRC 接收端,VPTFRC 机制的协议结构如图 5 所示.

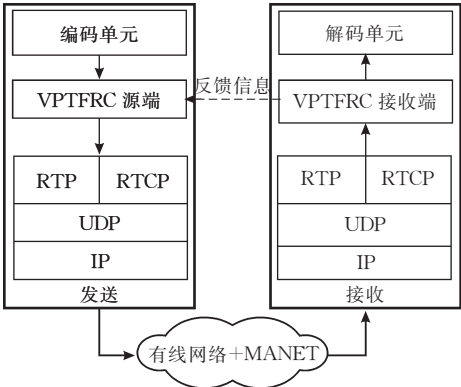


图 5 VPTFRC 协议结构

如图,源端和接收端工作于 RTP/RTCP、UDP 和 IP 协议之上,两者相互配合完成可靠的速率控制.其中,源端负责接收反馈信息,估计 RTT 和按照式(4)估计可用带宽,然后调整发送速率并按式(15)估计包长,最后将媒体内容打包为 RTP 包并采用 UDP 传输.以 MPEG4 码流为例,按以下规则将视频流编为 RTP 包:(1)每个 GOP(Group Of Pictures)作为一个单元并添加 GOP 标识;(2)按照 GOP 大小,GOP 中的各 VOP (Video Object Planes)分别打包,并添加 GOP 和 VOP 标识.相同的 VOP 包采用相同标识.接收端负责接收速率、丢包率估计和计算包重传概率并反馈至发送端,反馈信息由 RTCP 传输.

在该机制中,由于连接的起始阶段发送端无法获得必须的信息,因此发送速率调整无法按式(4)获得,此时必须采取探测机制直至获得需要的信息时结束,该阶段称为“探测阶段”.在获得相应信息后,VPTFRC 机制进入稳定调整器,即依据式(4)来估算发送速率.两个阶段具体的调整方法如下:

(1) 探测阶段

该阶段速率调整与 TFRC 相同^[7],初始速率

$$R_{\text{init}} = \frac{S}{RTT} \tag{22}$$

当发生丢包时,探测阶段中止,否则第 i 个调整时刻

的发送速率 R_i 按以下方法调整:

$$R_i = \min(2R_{i-1}, 2R_{\text{received},i}) \tag{23}$$

即取当前速率和接收端统计并反馈的接受速率 $R_{\text{received},i}$ 两者两倍的最小值,该方法仿照 TCP 保证过载时性能.

(2) 稳定调整期

在接收端,统计并反馈 PLR 和 PRR 值至源端.在算法选择方面,采用 NS2.26 中集成的 EBPH 估计方法.但该算法因统计时间间隔短而产生较大波动,为克服该缺点,提出平滑丢包率统计方法:采用统计值 P_i (PLR 或 PRR) 的指数平均值 \bar{P} 来代替之,定义加权因子 $\lambda = 2^{-5}$,且

$$\bar{P}_i = (1 - \lambda) \times \bar{P}_{i-1} + \lambda \times P_i \tag{24}$$

该方法称为平滑 EBPH 估计方法.

在源端主要完成发送速率估计、包长确定和由前两者确定发包速率.

首先采用下述策略调整速率 R_i :若由式(4)得到的 R_{est} 大于当前速率 R_{i-1} 时,按步幅 Δ 增大发送速率,且步幅^[7]

$$\Delta = n_{\text{rtt}} \times \frac{S_i}{RTT_i} \tag{25}$$

其中 n_{rtt} 表示两次调整时间段的 RTT 数目,且限定 $n_{\text{rtt}} \leq 2$.反之 $R_i = R_{\text{est}}$.由于链路层重传机制将增加无线链路负荷,使得排队延时增加,缓存溢出时会造成丢包.为寻找处理时延和传输时延的平衡,采用对发送速率进行“折扣”的方法.由第 2 节分析,为保证处理时延基本稳定,则需要保证数据量稳定.因此,若第 i 个调整时刻包重传概率为 PRR_i ,无线链路接入流媒体当前发送速率为 R_i ,类似式(9)得到无线链路包平均传输 $\frac{1}{1 - PRR_i}$ 次成功,则无线链路

实际带宽为 $\frac{R_i}{S_i} \times \frac{1}{1 - PRR_i} \times S_i$,即 $\frac{R_i}{1 - PRR_i}$ 大于 VPTFRC 调整带宽,因此排队时延大大增加,若定义折扣比列 $\rho_i = 1 - PRR_{i-1}$,折扣后实际发送速率为

$$R'_i = R_i \times \rho_i \tag{26}$$

则无线链路带宽为 $\frac{R'_i}{1 - PRR_i} = R_i$,与 VPTFRC 调整带宽一致.由于 TFRC 机制速率调整较缓和,因此可保证无线链路数据量短时特征基本稳定.

其次,为了得到调整包长,设初始包长 $S_0 = 1000$ 字节,为便于与 TFRC 比较,设 1000 字节为包长上限,若由反馈 PRR_i 值按式(15)求得包长为 S_v ,

则 VPTFRC 包长迭代策略按以下原则得到的第 i 个调整时刻包长 S_i : (1) 若 $S_V \geq S_0$, 则 $S_i = S_0$; (2) 若 $S_V < S_0$, 则 $S_i = S_V$.
最终得到发包速率.

5 性能评估

好的流媒体传输协议必需在具备平滑且较高的有效吞吐量、较小的传输时延及抖动和 TCP 友好性能. 其中有效吞吐量指标考察单位时间内有效传输数据和相对标准偏差(Relative Standard Deviation, RSD); 实时性主要考察多媒体帧传输时延及其抖动; 友好性即流间公平性考察公平度函数. 主要测量矩阵定义如下: 取多媒体帧长 I , 设测量的包传输时延及其抖动(用平均绝对偏差表示)分别为 D_P 和 J_P , 包到达间隔时间及其抖动分别为 D_{IP} 和 J_{IP} , 则定义多媒体帧平均传输时间

$$D_I = D_P + (I/S - 1) \times D_{IP} \tag{27}$$

平均帧时延抖动

$$J_I = J_P + (I/S - 1) \times J_{IP} \tag{28}$$

定义公平度 $e_{\delta,a,b}(t)$ 为不同流 a 和 b 在给定时间间隔 δ 内的公平性, 且^[7]

$$e_{\delta,a,b}(t) = \min\left(\frac{R_{\delta,a}}{R_{\delta,b}}, \frac{R_{\delta,b}}{R_{\delta,a}}\right), \text{ 当 } R_{\delta,a} > 0 \text{ 且 } R_{\delta,b} > 0 \tag{29}$$

式中 $R_{\delta,a}, R_{\delta,b}$ 分别表示时间间隔 δ 内 a, b 两流的有效吞吐量, 取两种比例的最小值则可保证公平结果在 0 和 1 之间. 值越接近 1 且变化平缓, 则称两流越“公平”.

5.1 仿真设置

仿真实验采用 NS2.26 仿真平台及如图 6 所示的测试环境, 包括位于有线网络的发送节点 S、网关节点 GW 和 15 个无线节点 (C1~C15), 其中 MANET 场景范围 1000m×500m, 水平方向节点间距 150m, 垂直方向间距 200m. 无线链路采用 802.11 协议 1M 模式并选择 DSDV 路由协议, 物理层采用 DSSS(Direct-Sequence Spread Spectrum)模式. 在 NS2.26 的无线物理层采用模拟无线传输干扰程序来设置误码率并假定反馈链路无误码. 测试误码率(实际误码率、实际广义误码率大于该值)分别为 $10^{-5}, 5 \times 10^{-5}, 10^{-4}$, 缺省包长为 1000 字节, 主干带宽 1Mbps. 采用固定包长(1000 字节)的 TFRC 方法作为比较协议. 包头大小 134 字节(其中 UDP 头 8 字节、IP 头 20 字, 802.11 MAC 及物理层

头为 58 字节, 其余为扩展的 RTP 头). 流媒体帧长 I 为 3000 字节. IEEE802.11 主要配置见表 2.

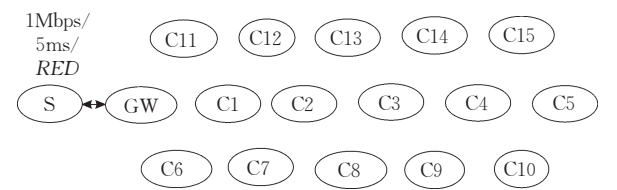


图 6 测试环境

表 2 IEEE802.11 实验参数

参数	含义	数值
SlotTime	时隙宽度	20μs
CWmin	最小冲突窗口	31
CWmax	最大冲突窗口	1023
SIFS	短帧间隙	10μs
EIFS	扩展帧间间隙	12μs
DIFS	帧间间隙	16μs
LongRetryLimit	最大重传次数	4

5.2 结果比较分析

(1) 检验速率折扣方法对包传输时延和包到达间隔时间的影响. 实验采用单跳拓扑, 设置误码率为 5×10^{-5} 经 100s 仿真测试的结果见图 7 和图 8 可见, 采用速率折扣方法时延改善效果明显, 该结论同样适用于多跳情况.

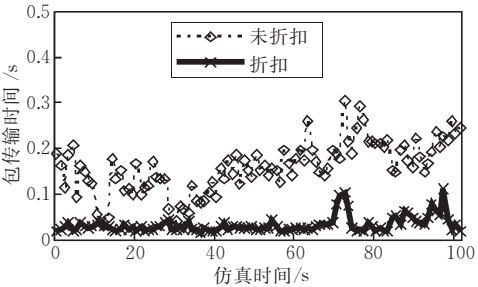


图 7 速率折扣与否包传输时间比较

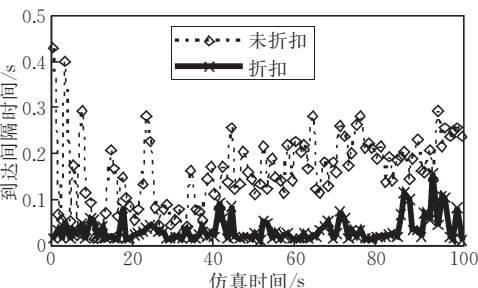


图 8 速率折扣与否包到达间隔时间比较

(2) 检验平滑 EBPH 估计方法效果. 采用单跳拓扑, 设置误码率为 5×10^{-5} , 经 100s 仿真测试(采样间隔 1s)并与标准 EBPH 方法结果比较, 分别包括丢包率和包重传概率统计结果、包长调整结果和有效吞吐量. 由图 9~图 12 可见, 平滑 EBPH 方法

丢包率和包重传概率统计结果波动较小,进而包长调整结果也相对平滑,最终有效吞吐量也较平缓.

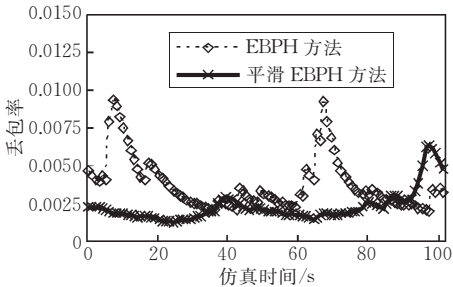


图 9 不同丢包率统计方法的丢包率比较

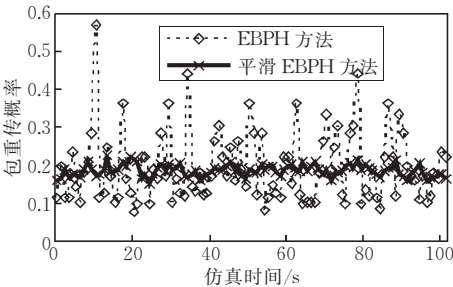


图 10 不同丢包率统计方法的包重传概率比较

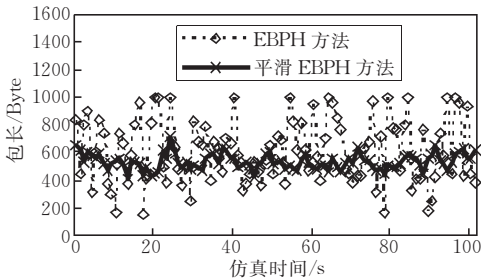


图 11 不同丢包率统计方法的包长比较

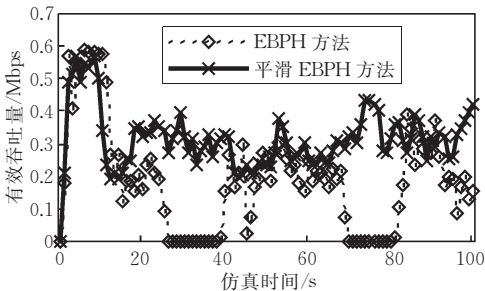


图 12 不同丢包率统计方法的有效吞吐量比较

(3) 取 400s 的仿真时间,比较 VPTFRC 和 TFRC 两种协议在不同误码率设置下多跳 MANET 流媒体传输的性能(见图 13~图 17). 其中,图 13 表明 VPTFRC 平均 PLR 值下降明显,以 4 跳为例,在误码率设置为 10^{-4} , 5×10^{-5} 和 10^{-5} 时分别下降约 63.56%, 51.66% 和 18.02%;图 14、图 15 中有效吞吐量及其 RSD 基本按误码率增高和跳数增加而改善效果逾趋明显,例如单跳时在误码率设置 10^{-4} 时

有效吞吐量提高 270.23%,在 5×10^{-5} , 10^{-5} 时由于折扣算法的影响与 TFRC 相比基本相当,其中误码率设置为 5×10^{-5} 时下降 4.4%,而 10^{-5} 是约下降 0.87%,但有效吞吐量变化相对较平缓;图 16 和图 17 表明多媒体平均帧传输时延和抖动大幅度下降,两者规律类似. 例如误码率设置为 10^{-5} , 5×10^{-5} 时 1~5 跳平均帧传输时延较 TFRC 分别降低: 62.78%, 21.48%, 15.6%, 5.58%, 5.49% 和 77.1%, 60.87%, 47%, 34.97%, 29.93%. 平均帧时延抖动改善 61.93%, 29.1%, 18.66%, 17.44%, 2.07% 和 79.61%, 62.91%, 47.03%, 19.51%, 12.75%, 而 10^{-4} 时由于 TFRC 吞吐量远小于 VPTFRC,因此平均帧传输时延与 VPTFRC 相当,而平均帧时延抖动则小于 VPTFRC. 此外,当误码率为 10^{-5} 时,由于吞吐量较其它设置时大,进而排队处理时延增加,因此时延增加明显. 由于后者未考虑排队等处理时延的影响,实际试验的帧传输时延大于理论结果.

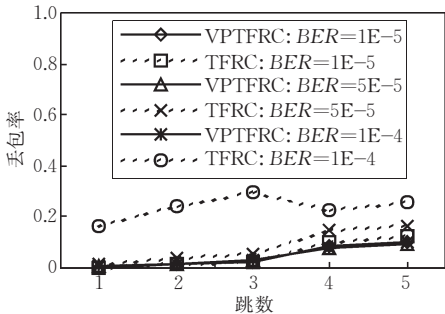


图 13 不同丢包率统计方法的 PLR 统计结果

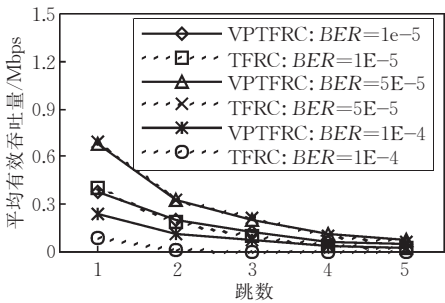


图 14 不同误码率设置时有效吞吐量比较

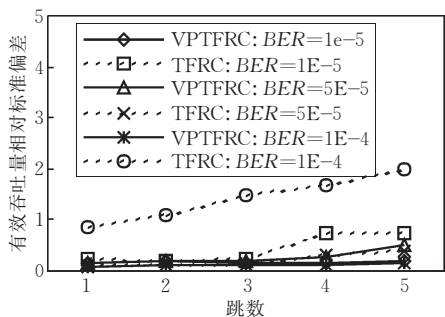


图 15 不同误码率有效吞吐量 RSD 比较

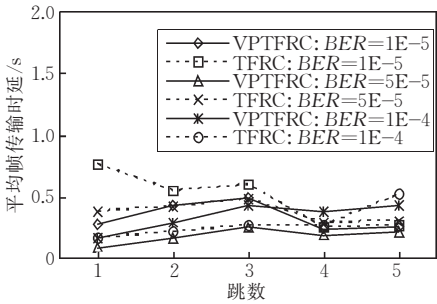


图 16 不同误码率设置的平均帧传输时延比较

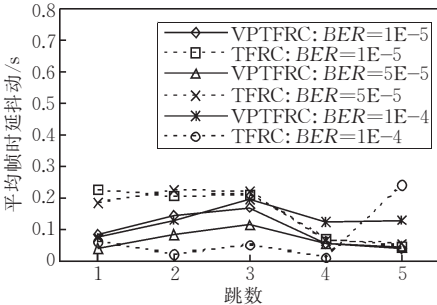


图 17 不同误码率设置平均帧时延抖动比较

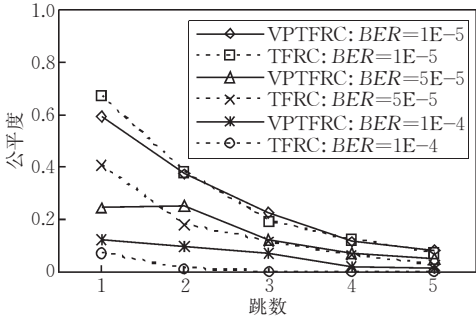


图 18 不同误码率设置时公平度比较

(4) 取 $\delta=10\text{s}$, 在共享链路(S-GW)同时运行 TCP 流(采用 TCP-Reno 协议)和 VPTFRC 流, 经 400s 仿真时间评估两协议的平均公平度. 如图 18 所示, 公平度值基本随误码率升高和跳数增加而降低, 其中在误码率设置为 10^{-5} , 5×10^{-5} 时, VPTFRC 与 TFRC 公平度值在跳数较少时(<3 跳)基本相当, 在跳数较多时 VTFRC 则略优于 TFRC 值; 在误码率设置为 10^{-4} 时, VPTFRC 获得了较大且较平缓的公平度值. 可见, VPTFRC 机制较 TFRC 具备更好的 TCP 友好性.

以上实验结果验证了采用 VPTFRC 自适应速率调整策略较应用 TFRC 调整策略对于误码和网络拥塞事件具备更好的健壮性和有效性, 而且在帧传输时延和有效吞吐量等指标上达到了较好的平衡, 尤其当跳数较多, 误码率较高时性能优势明显.

6 结束语

本文研究了适合多跳 MANET 的广义无线误码率影响流媒体帧传输时延的理论模型, 分析并建立了基于无线端到端包重传概率的时延约束方程, 得到在保证可靠传输的前提下, 满足重传时延最小的最佳包长与端到端包重传概率的关系式. 以此为基础, 提出适合 MANET 流媒体分发的传输层包长调整策略和速率折扣的 VPTFRC 机制. 首先将拥塞事件作为速率调整的基础, 根据 TFRC 方程来探测可用带宽, 然后将无线包重传概率作为包长调整和速率折扣的基础, 最终由发送速率和包长确定发包速率. 仿真实验表明, VPTFRC 具备了对不同信道误码特征的自适应调整能力, 与固定包长的 TFRC 方法相比可有效提高 MANET 流媒体业务的服务质量. 在后续研究中, 将考察 VPTFRC 机制在 MANET 等多跳无线网络中采用 MDC 技术进行多路传输中的作用.

参 考 文 献

[1] Feng Yan-Jun, Sun Li-Min, Qian Hua-Lin, Song Cheng. Improving TCP performance over MANET: A survey. Journal of Software, 2005, 16(3): 434-444(in Chinese)
(冯彦君, 孙利民, 钱华林, 宋成. MANET 中 TCP 改进研究综述. 软件学报, 2005, 16(3): 434-444)

[2] Aguayo D, Bicket J, Biswas S et al. Link-level measurements from an 802.11b mesh network//Proceedings of the ACM SIGCOMM'2004. Portland, OR, USA, 2004: 121-131

[3] Ghandeharizadeh S, Krishnamachari B, Song S S. Placement of continuous media in wireless peer-to-peer networks. IEEE Multimedia, 2004, 6(2): 335-342

[4] Bruno R, Conti M, Gregori E. Mesh networks: Commodity multihop Ad Hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(3): 123-131

[5] Etoh M, Yoshimura T. Advances in wireless video delivery. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(1): 121-122

[6] Fu Z H, Meng X Q, Lu S W. A transport protocol for supporting multimedia streaming in mobile Ad Hoc networks. IEEE Selected Areas in Communications, 2003, 21(10): 1615-1626

[7] Floyd S, Handley M, Padhye J et al. Equation-based congestion control for unicast applications//Proceedings of the SIGCOMM'2000. Stockholm, Sweden, 2000: 43-56

[8] Chen M H, Zakhor A. Rate control for streaming video over wireless//Proceedings of the INFOCOM'2004. Hong Kong, China, 2004, 2: 1181-1190

- [9] Akan Ö B, Akyildiz I F. ARC: The analytical rate control scheme for real-time traffic in Wireless networks. *IEEE/ACM Networking*, 2004, 12(4): 634-644
- [10] Feng Xiu-Bo. Review of error resilience techniques for wireless video transmission. *Journal of China Institute of Communications*, 2003, 24(12): 126-132(in Chinese)
(冯秀波. 无线视频传输容错算法研究新进展. *通信学报*, 2003, 24(12): 126-132)
- [11] Gurtov A, Floyd S. Modeling wireless links for transport protocols. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2004, 34(2): 85-95
- [12] Zhang Zhan-Jun. Guaranteeing end-to-end adaptive QoS in wireless multimedia networks. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(8): 1064-1073(in Chinese)
(张占军. 无线多媒体网络中端到端自适应 QoS 保证. *计算机学报*, 2004, 27(8): 1064-1073)
- [13] Yang Z K, Zhu X L, Du X et al. A proxy-based rate control strategy of streaming media distribution in heterogeneous access environment//*Proceedings of the SPIE VCIP'2005*. Beijing, China, 2005: 1617-1625
- [14] Wang X D, Yin J, Agrawal D P. Effects of contention window and packet size on the energy efficiency of wireless local area network//*Proceedings of the IEEE WCNC'2005*. New Orleans, Louisiana, USA, 2005: 94-99



ZHU Xiao-Liang, born in 1975, Ph.D.. His research interests include wireless multimedia communication and coding technologies.

YANG Zong-Kai, born in 1963, professor and Ph. D.

supervisor. His research interests focus on next generation Internet.

DU Xu, born in 1970, Ph. D., associate professor. His research interests include streaming media technologies and network caching.

CHENG Wen-Qing, born in 1963, Ph. D., professor. Her research interests include MANET and WSN.

Background

The project is one of the series studies of Streaming Media Transmissions in Internet in the Intelligent Internet Laboratory, Key laboratory of Hubei Province. The main objective of the project is to find effective schemes to translate multimedia information throughout both wireless and wired Internet. There are two directions authors are focusing on presently. One is wireless streaming transmission technology and the other is network caching. These methodologies are interrelated. One aspect of the project is supported the supports from National Natural Science Foundation of China (No. 60302004) and the Natural Science Foundation of Hubei

Province of China (No. 2005ABA264).

This paper aims to solve a kind of fundamental issues related to end-to-end rate control of MANET streaming media distribution with variable packet size that is thought to be more effective to minimize transmission delay than fixed one. Furthermore, the paper gives a further way to adjust packet size by generalized BER based delay-constrained equation in transport layer. The next step is to apply the generalized BER based packet size adjustment algorithms to wireless multi-path MDC transmission.