

率失真优化的无线多跳网络多路径选择算法^{*}

张行功, 郭宗明⁺

(北京大学 计算机科学技术研究所, 北京 100871)

Rate-Distortion Optimized Multi-Path Selection for Video Streaming over Wireless Multi-Hop Networks

ZHANG Xing-Gong, GUO Zong-Ming⁺

(Institute of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhangxg@icst.pku.edu.cn, guozongming@pku.edu.cn

Zhang XG, Guo ZM. Rate-Distortion optimized multi-path selection for video streaming over wireless multi-hop networks. *Journal of Software*, 2011, 22(10): 2412-2424. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3884.htm>

Abstract: With the increase in bandwidth and computing power of wireless devices, video applications over wireless ad-hoc networks are expected to become widespread in intelligent vehicles, emergency communication, and battlefield command. However, a crucial problem is how to select the best paths for video streaming of qualify-on-service (QoS) in multi-hop wireless networks. Most of the existing research done on this topic tend to ignore the impacts of time-varying channel and wireless interference on the quality of multi-path video streaming. This paper proposes an optimized multi-path selection algorithm which takes not only network congestion into account, but also interference. Packet collision and delay in a MAC layer is predicted using the interference model. Each node is modeled as an $M/M/1/K$ queuing system. Packet delay and loss, due to congestion, are predicted using the queuing theory. The distortion of path is defined as a function of packet losses and delays along the path. The paths with the minimum estimated distortion are selected as the optimal routings. Extensive experiments in NS-2 simulation environment have been carried out. The experimental results show that this algorithm achieves a certain level of satisfaction in the QoS of video streaming.

Key words: multi-hop wireless network; multi-path routing; QoS of video streaming; rate-distortion; path selection

摘要: 随着无线网络技术的发展,基于无线多跳网的视频通信在智能交通、灾难应急和军事指挥等多个领域得到越来越广泛的应用。但是,如何保证无线视频的传输质量,是亟待解决的一个关键问题。已有多路径视频传输研究忽略了信道变化和路径间干扰。针对该问题,提出一种基于率失真预测的多路径选择优化算法。该算法不仅分析了网络拥塞对传输质量的影响,而且考虑了路径传输干扰等影响因素。首先,通过对无线信道建模,计算干扰条件下 MAC 层数据包碰撞概率和处理时间;其次,将无线节点建模为 $M/M/1/K$ 排队系统,利用排队论预测网络拥塞导致的延迟和丢包;最后,通过建立视频传输与 MAC 层性能以及网络拥塞之间的率失真函数关系,预测传输路径的视频失真。并以

* 基金项目: 国家自然科学基金(60902004); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320907); 国家发改委高技术计划([2010]3044)

收稿时间: 2009-11-18; 修改时间: 2010-03-05; 定稿时间: 2010-04-28

预测失真为尺度,选择失真近似最小的多路径作为路由.通过在 NS-2 网络模拟环境中的大量实验,验证了模型的有效性.仿真分析结果表明,该算法能够显著提高无线多跳网络中的视频传输质量.

关键词: 无线多跳网络;多路径路由;视频传输质量保证;率失真;路径选择

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

随着无线网络的发展和硬件成本的降低,面向移动自组网(MANET)的多媒体应用得到越来越多的关注.它具有自组网、无需固定基础设施、实时传输音视频数据等优点,在智能交通、灾难应急通信、多媒体传感器、视频监控和战场指挥通信等领域得到广泛应用.但是,MANET 同时也存在信道窄、干扰强、误码率高和节点移动等问题,而音视频传输要求高带宽、对延迟和丢包敏感.因此,如何在无线多跳网络上保证视频服务质量(QoS),是一个亟待解决的关键问题.

国内外已经开展的大量研究工作^[1-6]表明,多路径流传输(multi-path streaming)是一种提高无线视频传输质量的有效方法.由于多条路径的可靠性和传输带宽优于单一路径,因此,通过在源节点和目标节点之间构建多条传输路径,可以减少路径损坏对视频传输质量的影响^[1,2].而且,无线信道具有广播特性,适合构建多路径路由.目前已有大量多路径路由协议^[7-11]方面的研究,主要包括主动路由协议^[10]、按需路由协议^[9]等.国内相关研究^[12]也提出一种基于簇的多路径路由算法,以减少路由查找和维护代价.但这些协议多侧重于多路径查找和维护过程,忽略了对备选路径的选择.

多路径选择主要研究如何从候选路径中选择满足应用需求的多路径.已有多路径路由算法大都基于简单网络参数(如延迟、丢包、跳数等)^[3-6,9-11]进行路径选择.Lee 在 DSR^[7]协议的基础上,于 2001 年提出 SMR^[11]多路径路由协议.通过选择链路或节点最小相交的多条路径,建立最大分离路径路由.但该协议没有针对视频传输优化,也没有考虑无线网干扰、网络拥塞的影响.Apostolopoulos 提出 Internet 多路径视频传输^[1,2]方法,但却没有论述如何进行路径选择.针对该问题,Begen^[3]提出一种穷举搜索多路径选择算法 ESMR(exhaustive search multipath routing),遍历所有路径组合从而得到最优路径.Mao^[4,5]提出一种启发式遗传算法,减少了 ESMR 算法的复杂度.但是,这些研究均假设网络参数为静态,算法复杂度高,很难满足无线信道实时动态变化的要求.同时,他们也没有考虑路径间的干扰、网络拥塞和延迟的影响.

针对无线多跳网络的多路径视频传输,Wei^[13]提出一种干扰感知的多路径选择算法 IWM(interference aware multipath routing).根据无线信道干扰模型,建立链路竞争图(contention graph)^[14].所有相互干扰的无线链路构成一个竞争群(clique).通过计算竞争群中链路的丢包率,可以得到端到端路径的丢包率.以路径并发丢包率为尺度,选择相互干扰最小的多条路径传输 MDC 多路码流.但是,该方法没有考虑网络拥塞和延迟对视频传输失真的影响.针对网络拥塞问题,Zhang^[15]提出一种基于拥塞模型的路径选择方法.根据交叉层信息,利用 MAC 层的排队论模型预测拥塞导致的视频失真.但是,这些研究均未综合考虑路径干扰、网络拥塞以及延迟对无线视频传输失真的影响.

本文提出一种基于率失真预测的多路径选择优化(optimized multi-path selection,简称 OMS)算法.通过对无线链路干扰和网络拥塞建模,预测路径的视频传输失真.并以率失真为尺度,选择失真最小的多路径路由.算法充分考虑了多跳网络的路径干扰、网络拥塞和视频编码等因素对视频传输的影响.通过建立视频传输与网络丢包、延迟之间的率失真函数关系,预测路径的传输失真.利用无线链路竞争模型对干扰建模,计算 MAC 层的数据包碰撞概率和信道冻结时间.并将无线节点建模为 $M/M/1/K$ 排队系统,利用排队理论预测网络拥塞导致的延迟和丢包.

本文主要有两个贡献:

- (1) 通过建立节点干扰和排队系统模型,对无线多跳网络中的视频传输失真进行预测.该方法不仅考虑了路径干扰,也考虑了网络拥塞对传输质量的影响,模拟真实无线网络环境;
- (2) 充分考虑到网络传输延迟对视频失真的影响.由于视频数据具有延迟敏感性,超时数据包同样也导致失真.

1 网络率失真模型

视频压缩数据具有丢包敏感和延迟敏感的特性.目前,主流视频压缩方法一般采用混和运动补偿(hybrid motion compensate)编码,视频序列被编码为帧内预测(I)、前向预测(P)和双向预测(B),前后帧之间存在依赖关系.在网络传输过程中,每一帧数据被封装到一个或多个网络数据包.一个网络数据包的丢失,将会影响到当前帧及后序帧的解码,从而导致视频质量下降.此外,视频是按时间顺序排列的数据,数据包需要在规定延迟内抵达.如果某一帧数据在播放时刻尚未完整到达解码器,则该数据将被解码器丢弃,从而产生视频抖动等质量问题.

无线多跳网络中延迟和丢包的原因主要有两种:信道干扰和网络拥塞.在 IEEE 802.11 标准^[16]中,无线节点采用载波侦听和碰撞避免(CSMA/CA)机制进行信道竞争.当发生数据包碰撞或物理层信号错误时,发送端将重传该数据包.当重传次数超过最大允许失败次数时,数据包丢失.如果发生网络拥塞,缓冲区溢出也会导致丢包.而网络延迟主要由数据包处理和排队等待时间组成.数据包处理时间是 MAC 层信道竞争和数据包发送所需的时间,而排队等待时间是指数据包在缓冲区中等待发送的时间.

我们采用 Stuhlmüller^[17]提出的一种经验性率失真模型,建立视频传输失真与网络参数之间的函数关系.该模型针对混和运动补偿编码标准,将失真定义为编码码率、网络丢包、延迟的函数.对于一个编码码率为 R 的视频序列,其视频传输失真由 3 部分组成:编码失真 D^{enc} ,丢包失真 D^{error} 和超时失真 D^{delay} .公式表示为

$$D = D^{enc} + D^{error} + D^{delay} \\ = \left(D_0 + \frac{\omega}{R - R_0} \right) + \kappa P^{error} + \kappa(1 - P^{error})P^{delay} \quad (1)$$

其中, D_0, R_0, ω, κ 是与编码器和视频序列相关的常量, P^{error} 为网络丢包概率, P^{delay} 为数据包超时概率.针对指定视频序列和编解码器,编码失真 D^{enc} 主要由编码码率决定.由于 Mao^[5]已经讨论了多路径的码率分配问题,本文重点讨论视频传输的后两部分失真:丢包失真和超时失真.我们利用 MAC 层的干扰模型和网络拥塞的队列模型,预测无线多跳网络的丢包率和超时概率.

2 IEEE 802.11 数据包处理分析

IEEE 802.11 分布式协同机制(DCF)的工作模式^[16]有两种:基本模式和 RTS/CTS 模式.其中,RTS/CTS 模式采用 4 次握手,缓解隐藏终端(hidden-station)和暴露终端(exposed-station)问题的影响.本文主要讨论在 RTS/CTS 模式下的路径选择.

在 RTS/CTS 模式中,发送方首先监听信道是否空闲.如果空闲时间超过 t_{DIFS} (分布式帧间时间),回退计时器开始计时.当计数器为 0 时,发送节点先发送一个 RTS 数据包,用于请求发送;接收节点收到 RTS 包后等待一个 t_{SIFS} (短帧时间),然后回送一个 CTS 数据包,确认信道可用.发送方收到 CTS 包后,确认可以发送数据.在 t_{SIFS} 时间后发送数据(发送时间为 t_{DATA});当接收节点接收数据成功后,等待 t_{SIFS} 时间后发送一个 ACK 确认消息.从而,接收双方确认进行了一次成功的数据传输.因此,一次成功的数据传输所占信道时间 T_s 可表示为

$$T_s = t_{DIFS} + t_{RTS} + t_{CTS} + t_{DATA} + t_{ACK} + 3t_{SIFS} \quad (2)$$

在 RTS/CTS 模式中,发生数据传输失败的情况有两种:一种是 RTS/CTS 握手不成功,另一种是数据发送过程中发生失败.发送方发送数据后,如果 $t_{CTSTimeout}$ 时间内没有收到 ACK 消息,则认为发送失败.发送方将侦听信道,重新开始新一轮的数据发送.因此,一次失败数据发送所占用的时间 T_c 可以表示为

$$T_c = t_{DIFS} + t_{RTS} + t_{CTSTimeout} \quad (3)$$

在上述公式中, $t_{DIFS}, t_{SIFS}, t_{RTS}, t_{CTS}, t_{ACK}, t_{CTSTimeout}$ 均是和信道参数相关的常量. t_{DATA} 为数据本身占用信道时间,由数据包大小和信道带宽决定.本文中假设所有传输数据包大小均为固定长度.

IEEE 802.11 采用载波侦听多路访问(CSMA)机制.当发生传输错误时,发送方需要不断地竞争信道进行重传.在碰撞避免(CA)协议中,采用二进制指数回退机制降低数据包碰撞概率.每次发送之前,发送方都会随机从

竞争窗口(0,CW)之间选择一个随机数作为回退计数器.当计数器回退到 0 时,开始发送数据.CW 为竞争窗口大小,其最小值为 W.每次发送重试,CW 的值都会增加 1 倍.因此,第 i 次发送的 CW 取值为 $2^{i-1}W$.假设系统设定发送重传次数上限为 m 次,如果发生 m 次数据传输失败,则该数据包被丢弃.假设数据发送失败概率为 p_c ,则发送重试过程的 Markov 状态链^[18]如图 1 所示.

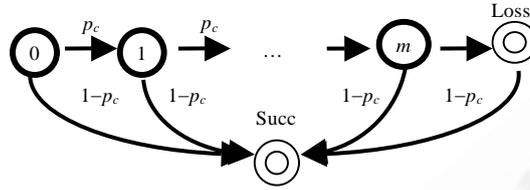


Fig.1 Markov process of MAC retransmission

图 1 数据发送重试的 Markov 链

根据该模型,可以得到 MAC 层数据包期望处理时间 $E[X]$:

$$E[X] = \sum_{i=0}^{m-1} p_c^i (1-p_c) [i(T_c + T_b) + (T_s + T_b)] + p_c^m m(T_c + T_b) \quad (4)$$

其中, T_b 为回退等待时间,它包括回退计时器时间和信道冻结时间.在回退等待过程中,发送节点监听信道繁忙程度.当信道空闲时,计时器启动计数;当信道繁忙时,计时器冻结.我们定义信道冻结时间比例为信道冻结时间与回退等待时间的比值,假设为 p_f ,则在第 i 次发送的回退等待时间 T_b 为

$$T_b = \frac{\text{回退计时器大小}}{1 - \text{信道冻结比例}} = \frac{(2^{i-1}w - 1)/2}{1 - p_f} \quad (5)$$

在上述公式中, T_s, T_c, m, w 均为系统相关常量.只要得到数据发送失败概率 p_c 、信道冻结比例 p_f ,就可以计算 $E[X]$ 值.

2.1 无线信道干扰模型

本节通过对无线链路干扰建模,采用竞争图模型^[14]分析 MAC 层数据包的碰撞和信道冻结时间.

假设无线节点的数据发送速率为 u ,即每个数据包的平均发送时间为 $1/u$.由公式(4)可知,一个数据包的发送时间包括回退时间、信道冻结时间、碰撞时间和数据传输占用信道时间.其中,数据传输占用信道时间为 T_s ,由于 RTS/CTS 数据包较小,可以忽略 RTS/CTS 数据包碰撞导致的信道占用时间.因此,成功发送一个数据包所占信道时间的比例可近似为

$$\theta \approx \frac{\text{成功发送占用信道时间}}{\text{数据包平均发送时间}} = \mu T_s \quad (6)$$

在 IEEE 802.11 网络中存在两种距离:传输距离(RX_Range)和干扰距离(IF_Range).通常,干扰距离大于传输距离.例如,在 Lucent WaveLAN 网卡中, RX_Range 为 250m,而 IF_Range 为 550m.传输距离是数据包在两个节点间成功传输的最大距离,它由发射能量和信道传播特性决定.干扰距离是指在此距离范围内的所有节点都可以收到发射源的信号.通常,干扰距离也是载波侦听距离,无线节点可以探测到该范围内其他节点是否在占用信道.

针对一条无线数据链接,可将其邻居节点划分为载波侦听区域(CS)和干扰区域(IF).假设发送节点为 s ,接收节点为 d .CS 区域是指到发送节点 s 距离小于 IF_Range 的区域,发送节点可以侦听到此区域所有节点发出的信号.干扰区域是指距离发送节点 s 大于 IF_Range 但到接收节点 d 小于 IF_Range 的区域.当此区域的节点发送数据时,发送节点 s 检测不到信号,但接收节点 d 会受到信号干扰,从而导致数据包碰撞,也即隐藏终端问题(hidden stations problem).CS 区域和 IF 区域分别如图 2 所示.

定义所有落在 CS 区域的节点集合为 $CS(s,d)$,所有落在 IF 区域的节点集合为 $IF(s,d)$.对于集合中的任意两

个节点 i, j , 假设其距离为 $d(i, j)$. 如果 $d(i, j)$ 小于 IF_Range , 两个节点可以检测到彼此的信号. 根据载波侦听机制, 两个节点不能同时发送数据. 如果 $d(i, j)$ 大于 IF_Range , 则两个节点可以同时发送数据. 因此, 任意两点组成的集合所占信道的时间比例为

$$\theta_{ij} = \theta_i \cup \theta_j = \begin{cases} \theta_i + \theta_j - \theta_i \theta_j, & d(i, j) > IF_Range \\ \theta_i + \theta_j, & d(i, j) \leq IF_Range \end{cases} \quad (7)$$

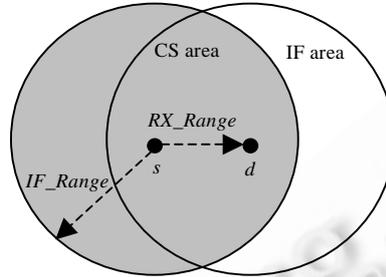


Fig.2 Carrier-Sensing area and interference area

图 2 CS 区域和 IF 区域划分

由公式(7), 我们可以得到 $CS(s, d)$ 集合所占信道的时间比例, 记为 θ_{CS} . 同样, 得到 $IF(s, d)$ 集合所占信道的时间比例为 θ_{IF} .

当 CS 集合节点发送数据时, 发送节点检测到信道繁忙, 将冻结回退计时器. 因此, CS 节点集合发送数据的时间就是发送节点 s 的信道冻结时间. 如果发送节点占用信道的时间比例为 θ_s , 则信道冻结时间比例 p_f 可表示为

$$p_f = \frac{\theta_{CS}}{1 - \theta_s} \quad (8)$$

当 IF 区域节点和发送节点同时发送时, 在接收节点上会导致数据包发生碰撞. 由于发送节点 s 随机选择回退窗口中的任意时刻发送数据, 数据包碰撞概率等于 IF 节点占用信道时间与回退时间的比值. 因此, 数据包碰撞导致的数据发送失败概率可以表示为

$$p_c = \frac{\theta_{IF}}{1 - \theta_s} \quad (9)$$

将公式(8)、公式(9)带入公式(4)中, 我们就可以计算得到每个数据包的平均处理时间 $E[X]$.

2.2 网络拥塞的延迟和丢包分析

基于前述 MAC 层数据包期望处理时间, 本节利用排队模型分析网络拥塞导致的数据包延迟和丢包.

无线节点发送数据前, 先将数据包缓存至发送队列(IFQ), 等待 MAC 层处理. 当 MAC 层空闲时, 按照先进先出(FIFO)原则, 取出队列头第 1 个数据包处理. 只有当队列中前面的数据包被处理完毕, 新到达的数据包才能被处理. 因此, 无线节点的数据包延迟包括两部分: 排队等待延迟和 MAC 层处理时间. 无线节点的 IFQ 队列长度通常为固定大小. 当 MAC 层处理速度慢于数据包到达速度时, 队列将发生溢出, 从而导致网络丢包.

可将无线节点的 IFQ 队列建模为一个 $M/M/1/K$ 排队系统^[19]. 假设到达数据包按照泊松(Poisson)分布依次进入队列, 即单位时间内到达的数据包个数是完全随机的. 数据进入节点后, 在一个长度为 K 的队列中缓存等待. 同时, 假设 MAC 层的数据包处理时间满足独立指数随机分布, 即前后两个数据包处理时间没有关系. 因此, 无线节点的 $M/M/1/K$ 模型如图 3 所示.

对于一条无背景流量的无线路径, 任一节点的数据包到达速率均由其前一跳的输出码率和丢包率来决定. 对于路径的第 1 个节点, 其数据包到达速率为编码器输出的视频码率. 对于路径上第 n 个节点, 如果 λ_{n-1} 为前一节点的数据包到达码率, P_{n-1}^{error} 和 P_{n-1}^{delay} 为前一节点的排队丢包率和超时概率, 则节点 n 的数据包到达速率为

$$\lambda_n = \lambda_{n-1} \times (1 - P_{n-1}^{error}) (1 - P_{n-1}^{delay}) \quad (10)$$

由公式(4)可知,节点 n 的 MAC 层数据包平均处理时间为 $E[X_n]$.在队列长度为 K 的发送缓存队列中,其队列溢出概率也是数据包的丢包概率.根据 $M/M/1/K$ 的排队论公式,节点 n 的排队丢包率可以表示为

$$\pi = \frac{(1 - \lambda_n E[X_n]) \lambda_n^K E[X_n]^K}{(1 - \lambda_n^{K+1} E[X_n]^{K+1})} \quad (11)$$

数据包的平均延迟包括 MAC 层处理时间和队列等待时间.根据排队论的 Little 公式,我们可以得到在节点 n 上的数据包平均延迟 $E[T]$ 为

$$E[T] = \frac{E[X_n]}{1 - \lambda_n E[X_n]} - \frac{\lambda_n^K K E[X_n]^{K+1}}{1 - \lambda_n^{K+1} E[X_n]^{K+1}} \quad (12)$$

由此,我们得到由于网络拥塞导致的数据包延迟和丢包率.

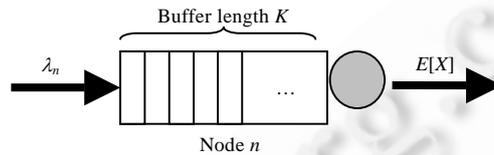


Fig.3 Queueing model of wireless node

图3 无线节点的排队模型

2.3 路径传输失真估计

一条路径的视频传输失真,是其上所有链接的传输失真之和.因此,通过分析无线节点的失真,就可以得到路径的传输失真.由公式(1)可知,数据包丢失和传输超时都会导致视频传输失真.下面分别讨论如何得到无线节点的网络丢包率 P^{error} 和传输超时概率 P^{delay} .

无线节点上发生数据包丢失的原因主要有两种:发送缓存队列 IFQ 溢出、MAC 层传输失败导致丢包.其中:IFQ 的队列溢出概率可由公式(11)得到;MAC 层发生 m 次重传失败后,也会导致丢包.因此,无线节点的丢包率可以表示为

$$P^{error} = \pi + (1 - \pi) p_c^m \quad (13)$$

网络延迟也会导致视频失真.视频是顺序播放的流媒体数据,如果数据包传输时间超时,则解码器将不处理该数据包.假设视频解码器的延迟上限为 Δ ,数据包到达该无线节点的平均延迟为 t .无线节点的数据包处理时间 $E[X]$ 、平均延迟时间 $E[T]$ 和数据包达到速率可分别由公式(4)、公式(12)、公式(10)得到.根据排队延迟的长尾分布理论^[20,21],无线节点的超时概率可近似为

$$P^{delay} \approx \lambda E[X] e^{-\frac{-\lambda E[X](\Delta-t)}{E[T]}} \quad (14)$$

假设一条无线路径上有 N 个节点,每个节点的数据丢包率和超时概率由上述公式可得.路径的视频传输失真真是其上所有节点的失真之和.因此,该路径的传输失真为

$$D_{path} = D_0 + \frac{\omega}{R - R_0} + \kappa \sum_{i=0}^N P_i^{error} + \kappa \sum_{i=0}^N (1 - P_i^{error}) P_i^{delay} \quad (15)$$

3 多路径选择优化算法

根据上述公式,可采用 ESMR(exhaustive search multipath routing)穷举法进行多路径选择.通过枚举计算所有路径组合的率失真,从中选择失真最小的路径组合作为多路径路由.该方法可以找到最优的多路径,但计算复杂度较高.其遍历所有路径组合,算法复杂度为 $O(N^2)$ (N 为备选路径数),无法满足无线网络实时动态变化的要求.

因此,我们提出一种 OMS 近似算法,以降低路径选择复杂度.首先,在不考虑路径间干扰的情况下计算每条无线路径的传输失真,选择失真最小的路径作为第 1 条路径.然后,在考虑第 1 条路径干扰的条件下,估计剩余路

径的传输失真,从中选择失真最小的路径作为第2条路径.依此类推,得到次优的多路径路由.该算法的复杂度为 $O(N)$,计算量小.在动态变化的无线网络中,可以快速找到视频传输路径.

OMS 算法虽然不是最优的路径选择算法,但在实际无线多跳网络中,其结果与 ESMR 算法接近.首先,视频失真与路径长度(HOPS 跳数)有直接关系,路径越长,失真也越大.因此,最优多路径算法一般会选择距离较小的路径.而 OMS 算法优先选择失真最小的路径,一般也是最小距离的那条路径,它属于最优路径集合的概率较高.其次,在无线多跳网中,干扰距离远远大于传输距离,长度较小的路径之间一般都存在重合节点或干扰.而且,这些路径大都在最短路径附近,它们的失真与它们对最短路径导致的失真差异不大.因此,OMS 算法选择的路径与最优多路径产生的失真比较接近.

OMS 算法流程见表 1.

Table 1 OMS path selection algorithm

表 1 OMS 路径选择算法

Algorithm OMS.	
Parameters:	
<i>CS_IF_SET</i> :	Set of wireless nodes;
<i>PATH_SET</i> :	Set of candidate paths;
<i>path_distortion</i> [<i>i</i>]:	Distortion of path [<i>i</i>];
<i>multi_path</i> [<i>k</i>]:	Output results;
1: for $k=0$ do	
2: for path $i \in \text{PATH_SET}$ do	
3: $\text{CS_IF_SET} \leftarrow$ all nodes belong to path i	
4: $\text{CS_IF_SET} \cup$ all nodes on $\text{multi_path}[0, \dots, k-1]$	
5: for node $j \in \text{path } i$ do	
6: $p_c[j] \leftarrow$ Collision probability by Equ.(9);	
7: $p_f[j] \leftarrow$ Channel freezing probability by Equ.(8);	
8: $X[j] \leftarrow$ Computing expected proc. time by Equ.(4);	
9: $D[j] \leftarrow$ Computing distortion by Equ.(1);	
10: end for node j	
11: $\text{Path_Distortion}[i] \leftarrow \sum_{j \in \text{path}[i]} D[j]$;	
12: end for path i ;	
12: $\text{multi_path}[k] \leftarrow \text{MinDistortion}(\text{PATH_SET})$;	
14: $\text{PATH_SET} \leftarrow \text{PATH_SET} - \text{multi_path}[k]$; Omitting nodes in $\text{multi_path}[k]$ from PATH-SET	
15: end for k	

我们在动态源地址路由(DSR)协议^[7]的基础上,实现了 OMS 路径选择算法.DSR 协议是一种源地址路由协议,路由信息保存在数据包头.当有数据发送时,无线节点从包头的路由表信息查找下一跳节点.OMS 多路径路由包括两个步骤:路由查找过程和路径选择过程.首先经过路由查找过程发现多条候选路径,然后采用路由选择算法确定适合视频传输的多路径.

路由查找模块采用传统的按需路由协议^[8],它仅在源节点有数据发送时才发起路由查找过程.源节点首先发起路由请求过程,向所有邻居节点广播路由请求消息(RREQ);中间节点收到 RREQ 消息后,判断目标地址是否为自己;如果自己不是目标节点,则中间节点继续广播 RREQ 消息.当消息到达目标节点后,则开始路由确认过程.目标节点回送路由确认消息(RREP),按照 RREQ 消息的接收路径,逆向传输给源节点.当源节点收到 RREP 消息后,确认从源节点到目标节点的路径搭建完毕.路由查找过程可以形成从源节点到目标节点的多条候选路径,发送端选择合适路径发送数据.

对 DSR 协议进行修改,保留其路由查找模块.增加信道侦听模块、路径选择模块,并修改数据包头数据结构,从而实现了 OMS 协议:

- (1) 信道侦听模块.在无线节点 MAC 层添加信道侦听模块,侦听处于 *IF_Range* 范围内的邻居节点状态以及它们的数据包发送速率.这些节点构成了该节点的 CS 节点集合;
- (2) 路径选择模块.修改 DSR 协议的路由选择模块,将原有的最短路径算法替换为 OMS 算法.当有数据包

发送时,利用 OMS 算法选择最优路径.将路径选择结果添加至包头,发送该数据包;

- (3) 包头信息.在 RREP 数据包头增加 CS 节点集合、节点发送码率信息.通过 RREP 包将这些信息回送到源节点.

4 模拟与性能评估

4.1 模拟环境与参数配置

本文在 NS-2^[22]无线网络模拟环境中对失真估计模型和路径选择算法进行了评估.网络模拟节点的物理层采用共享式物理信道模型,通信距离为 250m,干扰距离为 550m.无线信道的带宽是 1Mbps,无线节点的 MAC 层基于 IEEE 802.11 协议,使用 RTS/CTS 模式的无线局域网分布协作机制(DCF).模拟节点的缺省参数见表 2,其基本性能类似于 Lucent WaveLan 网卡.

Table 2 Parameters of wireless simulation networks

表 2 无线模拟环境缺省参数

Parameters	Values	Parameters	Values
Packet payload	8 184 bits	Channel bit rate	1M bit/s
MAC header	272 bits	Slot time	20 μ s
PHY header	128 bits	SIFS	28 μ s
ACK	112 bits+PHY	DIFS	128 μ s
RTS	160 bits+PHY	Retransmission limit	4
CTS	112 bits+PHY	MAC queue size	50
CW_{min}	32 bits	T_s	8 982 bits
CW_{max}	1 024 bits	T_c	8 713 bits

我们在 1000m \times 1000m 的空间中创建一个具有 16 个无线节点的拓扑.随机地从 16 个节点中选择两个节点作为发送方和接收方,其他节点随机选择一个目标节点发送背景流量.背景流量的数据包大小为 512 字节,流量码率从 0kbps~200kbps.

实验采用 Foreman 视频序列,使用基于 JVT/H.264^[23]视频编码压缩标准的 JM14 软件对其编码.序列格式为 CIF(352 \times 288),编码帧率为 10fps.我们设置 GOP 大小为 15 帧,编码方式为“IBBPBBP...”.编码后的码率为 50kbps.视频序列长度为 1 000 帧,每一帧封装成一个或多个 UDP 数据包,每个数据包长度不大于 1 024 字节.从编码序列中提取奇偶帧,在不同路径上传输奇数帧和偶数帧,从而实现多路径传输.

接收端播放缓冲区大小设置为 5s,用于平滑数据包延迟抖动,提高播放流畅性.视频数据按 RTP 格式封包,采用 UDP 协议在无线多跳网络中传输.播放缓冲区收到 UDP 数据包后,按照 RTP 包序号和时间戳对数据包进行排序,保证视频数据播放的有序性.

在实验中,首先对无线信道干扰模型和拥塞排队模型进行验证.比较模型结果和 NS-2 模拟器的实验结果,验证模型的正确性.其次,我们在网络模拟器中生成 200 个随机拓扑,测试静态拓扑下算法的性能.最后,在移动环境下比较算法与传统路径选择算法的性能差异.

4.2 模型验证

测试无线网络模拟器中的数据丢包率和延迟,并与模型计算结果进行比较,从而验证排队模型的正确性.

实验随机选择两个节点作为发送方和接收方,发送方持续向接收方发送 UDP 数据包.发送数据包大小固定为 1 024 字节,产生数据流量从 10kbps 增加到 1 000kbps.总共进行 30 轮测试,每轮测试时间为 100s.在发送端和接收端同时记录数据包的发送时间和接收时间,对数据包传输延迟和丢包率进行统计.计算不同传输码率下的平均时延和丢包率,所得实验结果如图 4 所示(其中,横坐标为输入码率).

NS-2 网络模拟结果如图 4 所示.当发送码流达到 800kbps 左右时,数据包传输时延开始急剧增加.平均时延从 0.01s 增加到 0.5s 左右,达到峰值后就基本保持不变.而网络丢包率随着发送码率的增加而呈线性增加,如图 2 所示,没有峰值.导致这种现象的原因为:当网络带宽饱和时,数据包处理速度慢于输入码率,导致无线节点的发

送数据缓冲队列溢出.新到达数据包必须等待队列中所有数据处理完毕才能够被处理.由于缓冲队列长度固定,因此每个数据包的平均延迟都等于队列中所有数据包处理完毕的时间.而当发生缓冲区溢出时,后续到达的数据包都将全部丢弃.因此,网络丢包率将随着发送码率的增长而呈线性增长.

同时,我们计算了网络干扰模型和 $M/M/1/K$ 排队模型中的理论延迟和丢包率.根据公式(11)~公式(13)计算的理论结果如图4所示.显然,模型得到的理论延迟和丢包率与 NS-2 实验结果曲线能够很好地吻合,从而验证了本文模型能够有效估算无线网络的传输延迟和丢包率.

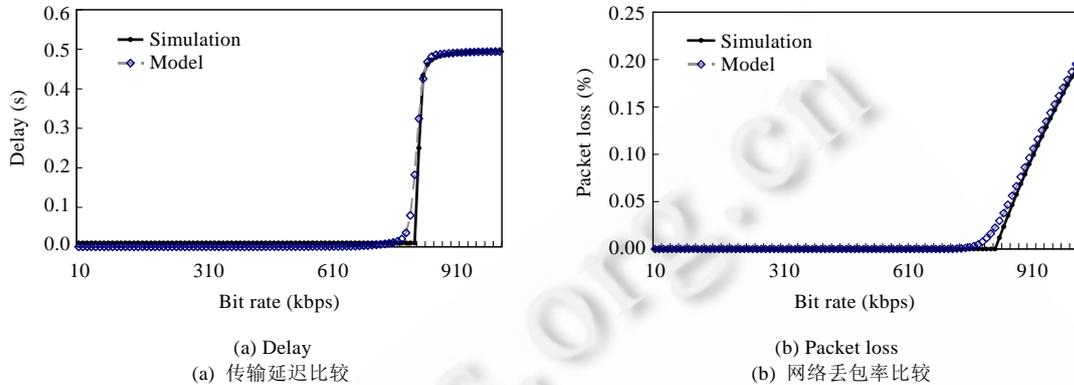


Fig.4 Comparison of modeling results and simulation results

图4 模型结果与 NS-2 网络模拟结果比较

4.3 性能评价对象

在 NS-2 模拟环境下,对 OMS 路径优化选择算法的性能进行了测试,并与分离多路径路由(split multi-path routing,简称 SMR)算法和 IWM(interference aware multipath routing)干扰感知多路径算法进行比较.性能评价指标包括平均峰值信噪比(PSNR)、丢帧率(frame lost ratio)和平均帧延迟(frame delay).

SMR 算法^[11]是一种按需路由(on-demand)算法,它优先选择节点或链接最大不相交的多条路径作为路由.该算法缺省认为,不相交路径具备最大的路径冗余和带宽资源.算法的路径选择过程如下:

- (1) 接收端等待接收端回送的多个路由请求(RREQ)消息,获取尽可能多的候选路径;然后,发送端选择最短路径作为第 1 条路径;
- (2) 接收端从候选路径集合中选出第 2 条路径,使其与第 1 条路径在节点或链路上重合得最少.如果所有候选路径重合度相同,则选择跳数(HOP)最小的路径;如果 HOP 数也相同,则选择 RREQ 消息传输最快的路径.

IWM 算法^[13]是一种针对多描述(MDC)视频传输的路径选择算法,其无线多跳网络的干扰建模.首先估计每一条链接的丢包率,其次计算传输路径的丢包估计,最后寻找并发丢包最小的多跳路径作为传输路径.

在相同拓扑、相同码率的条件下,传输相同的视频序列,统计接收到视频的平均峰值信噪比、平均丢帧率和平均帧延迟.

4.4 静态拓扑下的性能比较

利用 NS-2 的 Setdest 工具随机生成 200 组静态网络拓扑,测试 OMS,IWM 和 SMR 算法在静态拓扑中的性能.首先从 16 个无线节点中随机选择两个节点作为源节点和目标节点;源节点和目标节点记录每一帧的发送时间和接收时间;最后统计每一帧的延迟以及整段视频的丢帧率.总共进行了 200 轮测试,按照源节点和目标节点的距离(HOP)对实验结果进行排序.对相同 HOP 数的测试结果取平均值,并剔除偶然因素的影响.所得实验结果如图 5 所示(其中,横坐标为源节点与目标节点距离).

图 5(a)给出静态拓扑下视频传输的丢帧率.随着源节点到目标节点距离的增加,3 种算法的平均丢帧率延迟

逐渐变大.原因是,随着中转节点的增加,端到端带宽急剧下降.而当路径长度大于 4 跳后,平均丢帧率的增长趋向平缓.这是由于实验中设置信道干扰范围为 550m,有效传输距离为 250m 所致.对于简单线性拓扑,每个节点周围最多有 4 个干扰节点.即使路径长度大于 4 跳,干扰节点数量也不会随着路径长度的增加而变大.因此,当路径长度达到一定跳数时,传输路径的有效带宽基本保持不变,从而使平均丢帧率的增长变缓.

在相同拓扑下,本文提出的 OMS 算法具有最小丢帧率和延迟,如图 5(a)所示.当源节点和目标节点距离较近时,大多数路径均互相干扰,因此,3 种算法的丢包率相近.但是,由于 SMR 算法没有考虑干扰,因此其丢包率最大.而 IWM 算法优先选择互相不干扰路径,导致路径长度和传输延迟增加.因此,IWM 算法的平均帧延迟最大.

当距离大于 6 跳以后,相互不干扰的可选路径数量增加.IWM 算法和 OMS 算法所选择的路径趋同,两者的丢包率和延迟逐渐接近.但是,由于 IWM 算法没有考虑路径拥塞,导致其丢包率和延迟大于 OMS 算法.而 SMR 算法始终选择节点不相交路径,而不考虑路径间干扰,导致其丢包率和延迟最大.

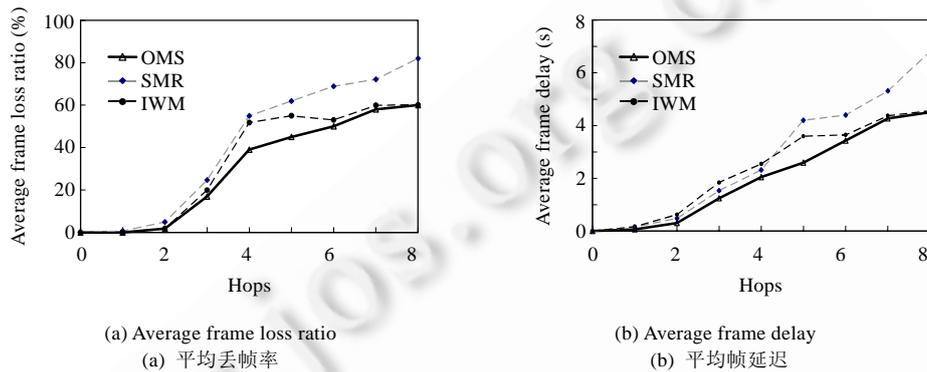


Fig.5 Performance comparisons in static topology

图 5 静态拓扑下 OMS 和 SMR 的性能比较

对接收端收到的视频质量进行了比较,如图 6 所示(其中,横坐标是视频帧序,纵坐标是接收端的视频质量 (PSNR 值)).随机选取一个预先创建的静态拓扑(本例为 Scen_17),用 3 种算法分别传输相同的视频序列.对收到的视频数据进行解码,逐帧计算 PSNR,比较传输过程中的视频质量变化.显然,SMR 算法的质量最差,平均 PSNR 仅为 26.23db.IWM 算法的 PSNR 值较高,平均为 32.99db.但由于其未考虑路径拥塞和延迟,受网路突发丢包 (burst loss)影响较大,从而使其 PSNR 低于 OMS 算法.

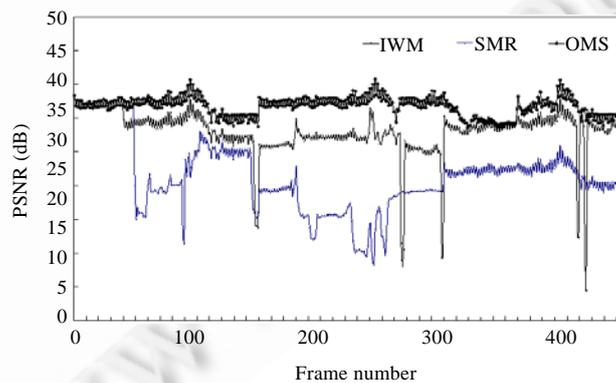


Fig.6 PSNR comparisons of received video

图 6 接收视频接收质量比较

OMS 算法能够检测路径间的干扰和网络拥塞,从而切换到延迟较低的路径.因此,当发生网络拥塞时,OMS 算法的视频质量能够很快恢复到 30db 以上.其平均 PSNR 达到 36.68db,接收端具有更好的接收质量.

4.5 移动拓扑下的性能比较

我们在移动环境下对 3 种算法的性能也进行了比较.网络拓扑采用了通用的 Random Waypoint 移动模型,每个节点随机选择一个初始位置,然后随机选择一个目标位置和速度,向目标位置移动.到达目标地点后,节点停留一段固定时间,然后重新开始运动.实验中,设置节点停顿时间为 1s,节点最大速度从 2m/s~20m/s,模拟城市中手持设备和汽车的移动速度.在每种速度设置下,节点随机选择小于其最大速度的一个数值,作为该次移动速度.我们创建了 200 个移动场景,计算不同最大速度情况下的平均丢帧率和帧延迟.

如图 7 所示(横坐标为最大移动速度):当最大移动速度小于 6m/s 时,3 种算法的平均丢帧率和延迟随着速度的增加而减少;而当最大移动速度大于 6m/s 时,算法性能随着速度增加而增加.这是由于当移动速度较慢时,速度对路由变动的影 响不大,反而增加了候选路径的数量,从而使多路径路由能够选择更优的路径;而当移动速度较快时,路径中断频率增加.频繁的路由修复过程将导致网络拥塞加重,从而使平均丢帧率和延迟增加.

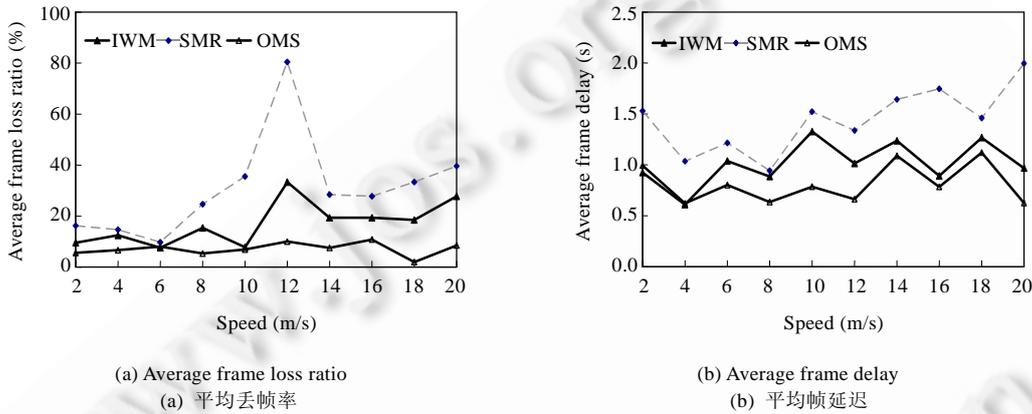


Fig.7 Performances in mobile topology

图 7 移动拓扑下平均丢帧率和帧延迟

由图 7 可知,在相同移动速度下,SMR 算法的丢帧率和延迟最大.尤其是当移动速度在 8m/s~12m/s 之间时,由于路由频繁更改,导致丢包率急剧增加.IWM 算法优先选择互不干扰路径,在低速移动时,其丢帧率与 OMS 算法接近;但当移动速度较大时,由于其未考虑路径变化导致的拥塞,丢帧率高于 OMS 算法.但在高速运动时,IWM 算法的延迟与 OMS 算法接近.这是由于高速运动时的延迟主要由路由修复时间组成,因此对两种算法的影响相同.

5 结 论

本文提出一种面向无线多跳网络的基于率失真估计的路径选择优化算法.通过建立视频失真和网络丢包、延迟间的函数关系,预测无线视频传输失真.以失真为尺度,选择传输失真最小的路径作为多路径路由.该算法综合考虑无线干扰和网络拥塞的影响,建立信道干扰和网络拥塞模型.利用 MAC 层干扰模型,预测数据包碰撞概率和信道冻结时间.同时,用 M/M/1/K 排队模型对无线节点建模,预测网络拥塞下的延迟和丢包率.根据链路丢包率和延迟估计,预测路径的视频传输失真.在 NS-2 网络模拟环境中进行了大量实验,实验结果验证了模型的正确性.表明该算法优于 IWM 算法和 SMR 算法,视频传输质量得到明显提高.下一步我们将对多路径传输的干扰模型进一步优化,并搭建 WiFi 实验床,在实际无线多跳网环境下优化多路径选择算法.

References:

- [1] Apostolopoulos J, Tan WT, Wee S, Wornell GW. Modeling path diversity for multiple description video communication. In: Mercer B, ed. Proc. of the IEEE ICASSP. Piscataway: IEEE Press, 2002. 13–17. [doi: 10.1109/ICASSP.2002.5745070]
- [2] Apostolopoulos JG. Reliable video communication over lossy packet networks using multiple state encoding and path diversity. In: Girod B, Steinbach EG, eds. Proc. of the Visual Communications and Image Processing. SPIE Press, 2001. 392–409.
- [3] Begen A, Altunbasak Y, Ergun O, Ammar M. Multi-Path selection for multiple description encoded video streaming. EURASIP Signal Processing: Image Communication, 2005,20(1):39–60.
- [4] Mao SW, Hou YT, Cheng X, Sherali H, Midkiff S, Zhang YQ. On routing for multiple description video over wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Multimedia, 2006,8(5):1063–1074. [doi: 10.1109/TMM.2006.879845]
- [5] Mao SW, Kompella S, Hou YT, Sherali HD, Midkiff SF. Routing for multiple concurrent video sessions in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Conf. on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2005. 1229–1235. [doi: 10.1109/ICC.2005.1494543]
- [6] Shiang HP, van der Schaar M. Multi-User video streaming over multi-hop wireless networks: A distributed, cross-layer approach based on priority queuing. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007,25(4):770–785. [doi: 10.1109/JSAC.2007.070513]
- [7] Johnson DB, Maltz DA, Hu YC, Jetcheva JG. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks. IETF Internet Draft (draft-ietf-manet-dsr-03.txt), 1999.
- [8] Perkins CE, Royer EM, Dos SR. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. IETF Internet Draft (draft-ietf-manetaodv-06.txt), 2000.
- [9] Marina MK, Das SR. On-Demand multipath distance vector routing in ad hoc networks. In: Tittsworth FM, ed. Proc. of the IEEE ICIP. Piscataway: IEEE Press, 2005. 14–23.
- [10] King PJB, Etorban A, Ibrahim IS. A DSDV-based multipath routing protocol for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 8th Annual Postgraduate Symp. on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting. 2002. 93–98. <http://www.cms.livjm.ac.uk/pgnet2007/Proceedings/Papers/2007-046.pdf>
- [11] Lee SJ, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE ICC. Piscataway: IEEE Press, 2001. 3201–3205. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7452> [doi: 10.1109/ICC.2001.937262]
- [12] An HY, Lu XC, Peng W. A cluster-based multipath routing algorithm in mobile ad hoc networks. Journal of Software, 2007,18(4):987–995. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/987.htm> [doi: 10.1360/jos180987]
- [13] Wei W, Zakhora A. Interference aware multipath selection for video streaming in wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2009,19(2):165–178. [doi: 10.1109/TCSVT.2008.2009242]
- [14] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. IEEE Trans. on Information Theory, 2000,46(2):388–404. [doi: 10.1109/18.825799]
- [15] Zhang XG, Pang Y, Guo ZM. Rate-Distortion based path selection for video streaming over wireless ad-hoc networks. In: Lin CY, Cox I, eds. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Multimedia & Expro. (ICME). IEEE Press, 2009. 754–757. [doi: 10.1109/ICME.2009.5202604]
- [16] IEEE Part11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. ANSI/IEEE Std.802.11, 1999(E), ISO/IEC, 8802-11, 1999.
- [17] Stuhlmüller K, Farberand N, Link M, Girod B. Analysis of transmission over loss channels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(6):1012–1032. [doi: 10.1109/49.848253]
- [18] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535–547. [doi: 10.1109/49.840210]
- [19] Yang WD, Ma JF, Li YH. Performance analysis based on packet arrival rate for the IEEE 802.11 DCF. Journal of Software, 2008,19(10):2762–2769. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2762.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02762]

- [20] Jiang T, Tham CK, Ko CC. An approximation for waiting time tail probabilities in multiclass systems. IEEE Communication Letters, 2001,5(4):175-177. [doi: 10.1109/4234.917105]
- [21] Abate J, Choudhury GL, Whitt W. Exponential approximations for tail probabilities in queues I: Waiting times. Operations Research, 1995,43(5):885-901. [doi: 10.1287/opre.43.5.885]
- [22] NS2: Network simulator. 2005. <http://www.isi.edu/nanam/ns>
- [23] ITU-T Rec. H.264/ISO/IEC 14496-10 AVC, Telecom. Standardization Sector of ITU, 2003.

附中文参考文献:

- [12] 安辉耀,卢锡城,彭伟.移动自组网中一种基于簇的多路径路由算法.软件学报,2007,18(4):987-995. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/987.htm> [doi: 10.1360/jos180987]
- [19] 杨卫东,马建峰,李亚辉.基于分组到达率的 802.11 DCF 性能分析.软件学报,2008,19(10):2762-2769. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2762.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02762]



张行功(1973—),男,湖北宜昌人,博士,副研究员,主要研究领域为无线网络,多媒体通信, IPTV.



郭宗明(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为视频处理,多媒体通信.