

视频失真优化的协作式无线网络编码机制

狄海阳¹ 白光伟^{1,2,3} 沈航³

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 211816)¹

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210009)²

(南京理工大学高维信息智能感知与系统教育部重点实验室 南京 210094)³

摘 要 网络编码技术能够显著提高无线多跳网络的吞吐量。当支持视频传输时,合理的网络编码选择对于提高视频质量具有极其重要的作用。首先提出一种效率优化的网络编码机制(ENC),并在此基础上,针对视频传输的特点,兼顾速率与失真率,提出基于速率控制的效率优化网络编码机制(ENC-RaDio),该机制利用拉格朗日乘子法选择期望传输速率下失真率最小的包发送,以便提高视频的传输质量。仿真实验表明,与典型的丢包感知网络编码协议相比,ENC-RaDio 机制能够显著提高视频序列的可解码帧率和吞吐量。

关键词 速率控制,网络编码,吞吐量,视频质量

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Video-distortion Optimized Cooperative Wireless Network Coding

DI Hai-yang¹ BAI Guang-wei^{1,2,3} SHEN Hang³

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)¹

(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210009, China)²

(Key Laboratory of Intelligent Perception and System for High-Dimensional Information of Ministry of Education, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)³

Abstract Network coding can greatly improve the network throughput. Especially, an appropriate network codes selection strategy is great important to enhance quality in video transmission. This paper proposes an efficient network coding scheme (ENC). On this basis, considering the characteristics of video transmission, we propose an efficiency optimized network coding scheme based on rate control (ENC-RaDio), using Lagrange multiplier method to choose those coded packets, such that we can achieve a lower distortion for video transmission. Our simulation results demonstrate that, compared with typical loss-aware network coding schemes, ENC-RaDio achieves significant performance improvement in terms of decodable frame ratio and throughput.

Keywords Rate control, Network coding, Throughput, Video quality

1 引言

近年来,随着通信网络基础设施的发展,多媒体业务在网络通信中占据越来越重要的地位。然而,由于通信网络不能提供可靠的数据传输,特别是无线网络信道存在衰落和干扰等特性会导致信息在传输过程中受到随机错误和突发错误的影响,导致多媒体信息在网络中传输时会发生误码或数据丢失等传输错误^[1],因此,视频传输质量的优化问题引起了学术界的广泛关注。目前,在无线网络环境中提供高品质的视频传输是一个具有挑战的问题,无线网络的不稳定以及随时间

变化等性质,使得视频传输对带宽、时延及时延抖动等提出了更高的服务质量要求^[2-4]。

网络编码(Network Coding)^[5,6]是一个新兴的研究领域,即网络中的节点不再仅仅具有存储转发的功能,而是允许节点对来自不同链路的数据包进行编码组合后再发送,增加单次传输的信息量,有效地提高网络的性能。随着基于网络编码的无线多媒体技术研究的不断深入,将会有越来越多的无线多媒体传输业务从中受益,但将网络编码应用到无线多媒体系统中,从理论到实际应用都处于不断完善和丰富的阶段。研究表明,引入速率控制的方法能够有效提高视频传输的质

本文受国家自然科学基金项目(60673185,61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2011186),南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金课题(NYKL201304),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13-414)资助。

狄海阳(1990-),女,硕士生,主要研究方向为无线网络编码;白光伟(1961-),博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究方向为网络体系结构和协议、无线传感器网络、无线移动 Internet 等,E-mail: bai@njtech.edu.cn(通信作者);沈航(1984-),男,博士生,CCF学生会员,主要研究方向为无线网络编码。

量^[7,8]。本文从提高无线网络视频数据传输质量的角度,将机会网络编码与速率控制相结合,综合考虑链路质量以及视频传输的质量问题,提出基于速率控制的效率优化网络编码机制,核心思路是将机会网络编码与速率控制相结合,选择能够使得视频失真率最小、可解码帧率最大的包发送,保证丢包严重环境下网络的通信性能。我们的仿真结果表明,该方法能够有效地提高可解码帧率、降低视频失真率,从而有效地提高网络的性能和视频传输的质量。

本文第2节深入分析研究现有网络编码协议存在的问题;第3节提出一种效率优化的网络编码机制(ENC)及其改进机制,即基于速率控制的效率优化网络编码机制(ENC-RaDio),并详细描述其工作原理;第4节通过仿真的方法对机制的性能进行分析与评价,最后总结全文。

2 相关工作

本节有针对性地描述两种典型的网络编码协议,COPE和CLONE。后者在前者的基础上,引入了丢包的概念,对COPE协议进行了改进。下面2.1节和2.2节分别介绍这两种协议。

2.1 COPE

Katti等人第一次将网络编码技术应用于真实的无线网络中^[9],通过图1所示的典型的Alice-Bob模型简述其工作原理。Alice需要发送数据包 p_1 给Bob,Bob需要发送数据包 p_2 给Alice。若使用传统方法,通过中间路由器Relay转发实现上述数据包的传输共需要4次传输;若使用COPE,中间路由器Relay对接收到的数据包 p_1 和 p_2 进行异或操作,然后广播编码包 $p_c = p_1 \oplus p_2$,Bob收到编码包后利用监听到的数据包 p_2 ,计算 $p_2 \oplus (p_1 \oplus p_2)$ 得到数据包 p_1 ,同样地,Alice通过计算 $p_1 \oplus (p_1 \oplus p_2)$ 得到数据包 p_2 ,完成此过程共需要3次传输。与传统方法相比较,COPE减少了一次传输,有效地提高了网络的吞吐量。

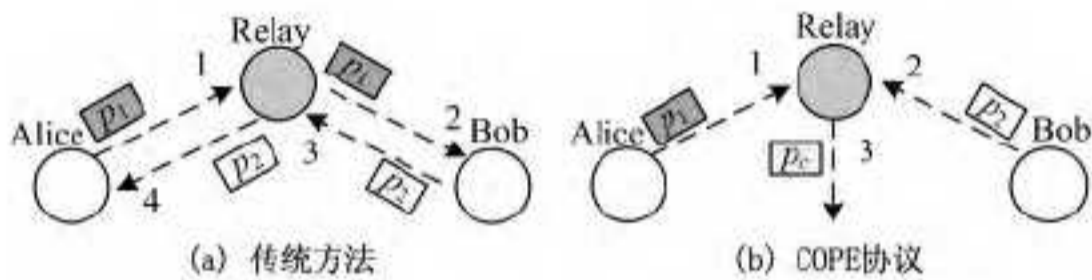


图1 传统方法与COPE协议的比较

此后,研究人员从创造更多编码机会的角度对COPE进行了有针对性的改进,设计了编码感知路由协议^[10]、多路径路由机制^[11]以及机会网络编码机制^[12]等。考虑到COPE仅仅是等待而非主动创造编码机会,Zhang等人提出了BEND协议^[13],即通过竞争的方式主动创造编码机会获得更高的性能增益。Hulya等人提出的基于视频感知的机会式网络编码协议^[14],以提高无线网络中多路单播视频流的传输质量为目的。其核心思想是,每个节点在对数据包进行网络编码时,不但考虑了编码包的可解码率,同时也考虑到视频数据包的重要程度及其解码截止时间,使得重要的或解码时间紧迫的视频数据能优先获得解码。但这种编码协议未考虑到无线信道的丢包情况,随着链路丢包率的增大,协议效果也将变差。

2.2 CLONE

如图2所示,节点A需要发送数据包 p_1 给节点B,节点B需要发送数据包 p_2 给节点C,节点C需要发送包 p_3 给节点A,通过中间节点R转发,假设链路 $R \rightarrow A, R \rightarrow B,$

$R \rightarrow C$ 丢包率为 ϵ ,从图中可以看出,COPE并不适用,因此本例中选择循环网络编码协议(CLONE中的Loop-coding协议)^[15],即发送3个编码包: $p_1 \oplus p_2, p_2 \oplus p_3, p_3 \oplus p_1$,该协议利用协作式网络编码,使多个编码包参与解码,得到原始包。每个节点接收到编码包后均有两种解码方式,如节点A解码出包 p_3 的方式:1) $p_1 \oplus (p_3 \oplus p_1)$;2) $p_1 \oplus (p_1 \oplus p_2) \oplus (p_2 \oplus p_3)$ 。节点A不能成功解码出包 p_3 的概率为 $\epsilon \cdot (1 - (1 - \epsilon)^2)$,显然有 $\epsilon \cdot (1 - (1 - \epsilon)^2) \leq \epsilon$ 。

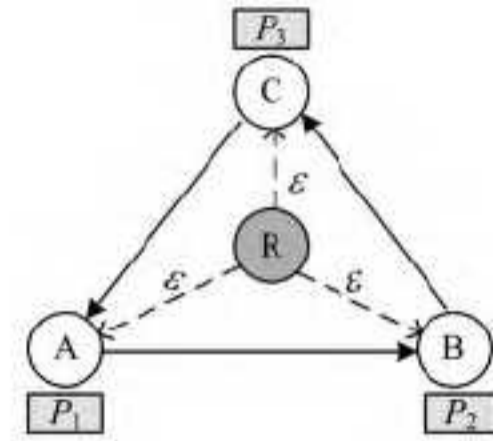


图2 循环拓扑结构图

Loop-coding协议通过增加冗余包(如上例中的 $p_3 \oplus p_1$),在一定程度上提高了可解码率。然而,该方法仅局限于两两编码包,限制了发送包所携带的信息量。而且,在无线网络视频流的传输中,不仅要考虑网络性能,更重要的是要考虑视频传输质量的优化问题,即视频失真问题。针对这一问题本文提出了一种基于速率控制的效率优化网络编码协议,综合考虑无线链路的丢包情况以及无线网络的视频传输质量的优化问题,将机会网络编码与速率控制相结合,以提高视频数据的传输质量。

3 丢包感知的协作网络编码机制

本节首先引入网络模型和相关定义,而后提出一种效率优化的网络编码机制(ENC),详细描述其工作原理,最后针对视频传输的特点,在ENC机制基础上提出基于速率控制的效率优化网络编码机制(ENC-RaDio),并详细描述其工作原理。

3.1 网络模型

本文考虑将机会网络编码与无线网络视频数据传输相结合,允许中间节点转发数据包到其他节点,这样就能够最大限度地提高视频传输的质量。如图3所示,记 $V = \cup v_i$ 为无线网络中节点的集合,其中 $i \in N, N$ 表示节点id集合;节点 v_i 对应的包的集合为 $p = \cup p_i, i \in N$ 。节点 v_i 中已含有的包的集合为 $k = \cup k_i, i \in N$,且 $k_i \subset p$ 。记 k_i 集合中所有可能的编码包为 c_k^i ,则节点 v_i 中所有数据包(包括编码包)的集合为 $T_i = p_i \cup \{p_i \oplus c_k^i\}$,节点 v_i 可通过集合 T_i 中任意一个包解码出包 p_i 。那么,所有节点中含有的包的集合可以表示为 $T = \cup T_i, i \in N$ 。另外,假定节点 v_i 利用集合 T_i 解出包 p_i 共有 η_i 种方式。

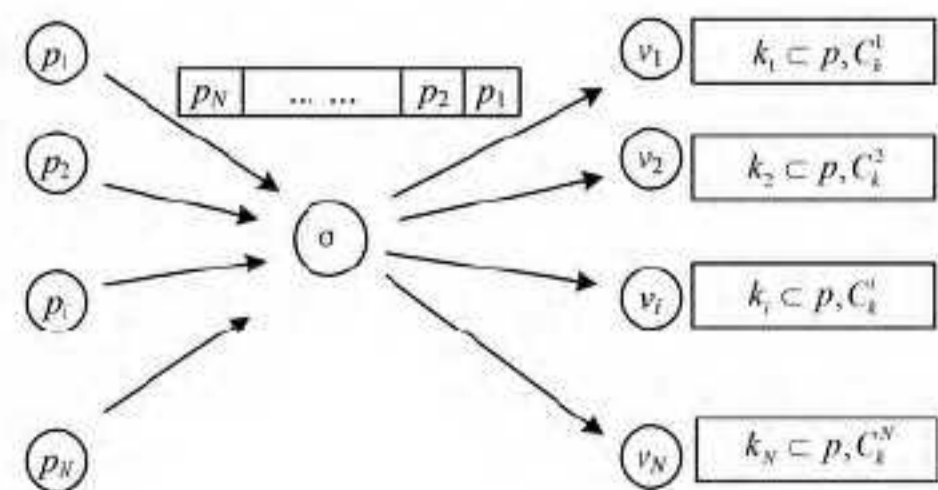


图3 网络模型

其中所有节点均可以进行简单的网络编码操作(异或),

即将来自多条链路的数据包融合为一个单独的编码信息流传输,同时假设所有节点采用混杂模式,即节点能够监听到所有邻居节点的数据传输,节点可以利用这些监听到的包解码出收到的编码包中的原始包,能够有效地提高网络的吞吐量。但是传输视频数据时,不仅要考虑吞吐量,更重要的是考虑视频传输的质量优化问题。本文提出的算法主要考虑选择发送哪些包能够同时提高传输视频数据的质量和网络吞吐量。

3.2 ENC 机制

为了提高网络的性能,获得更高的可靠性,本文提出 ENC 机制,该机制采用启发式的方法,使所有可能的编码包逐个参与竞争转发,并通过判断下一跳节点收到该包后解码方式数的多少来决定是否发送该包。本文可靠性主要通过编码包可解码率来反映。

定义 1(编码包可解码率,Decodable Coded Packet Rate, DCR) 目的节点能够解码出原始包的概率。设每个链路的丢包率为 ϵ ,且 $\eta_i=2$,则编码包可解码率的公式可表示为:

$$DCR=1-\epsilon^\omega \cdot (1-(1-\epsilon)^{\omega-\alpha}) \quad (1)$$

其中, ω 表示中间节点传输的编码包总数, α 表示第一种解码方式需要的编码包数目。

编码原则(即中间节点转发编码包 T_i ,应满足如下条件):

- 1) 保证每一个下一跳节点均能解出所需要的包,即 $\eta_i \geq 1$ 。
- 2) 选择能够使得下一跳节点的 η_i 值最大的包。
- 3) 当 $\eta_i \geq 2$,即所有下一跳节点解出所需包的解码方式数均不小于 2 时,则停止发送编码包。

定理 1 在 3.1 节的网络模型中,相同链路丢包率的情况下,ENC 和 CLONE 机制均能获得较高的可解码率,同时,ENC 的吞吐量优于 CLONE。

证明:假设 CLONE 机制中,节点 σ 发送 a 个编码包,ENC 机制中,节点 σ 转发 b 个编码包,且 $a \geq b$ 。包的长度均为 L ,定义 η_C 表示 CLONE 的解码方式数, η_E 表示 ENC 的解码方式数,显然 $\eta_C \geq 2$ 且 $\eta_E \geq 2$ 。则有:

$$DCR_{ENC}(\epsilon) \geq DCR_2(\epsilon) = 1 - \epsilon \cdot (1 - (1 - \epsilon)^{b-1})$$

假设 $\epsilon \in (0, 0.4)$, $b \in (2, n)$,由于 $1 - \epsilon$ 单调递减,而且 $b-1 > 1$,因此 $(1 - \epsilon)^{b-1}$ 单调递减,从而 $1 - \epsilon \cdot (1 - (1 - \epsilon)^{b-1})$ 单调递减,由此可知,

$$DCR_2(0.4) \leq DCR_2(\epsilon) \leq DCR_2(0)$$

其中

$$DCR_2(0) = 1$$

$$DCR_2(0.4) = 1 - 0.4 \times (1 - 0.6^{b-1}) \geq 1 - 0.4 \times (1 - 0.6^{n-1}) \geq 0.6$$

综上所述, $0.6 \leq DCR_{ENC}(\epsilon) \leq 1$,且 $0.6 \leq DCR_{CLONE}(\epsilon) \leq 1$,ENC 和 CLONE 的可解码率均较高。

对于吞吐量的计算,假设数据传输速率为 R ,发送 y 个数据包需要的时间为 $\tau = y \cdot L/R$,则 $\tau_C = a \cdot L/R$, $\tau_E = b \cdot L/R$,定义 φ 为单位时间内传输的数据量,则有:

$$\varphi_C = \frac{n \cdot L}{\tau_C} = \frac{n \cdot R}{a}$$

$$\varphi_E = \frac{n \cdot L}{\tau_E} = \frac{n \cdot R}{b}$$

又由于 $a \geq b$,因此 $\varphi_C \leq \varphi_E$ 。

综上所述,ENC 和 CLONE 机制均能获得较高的可解码

率,ENC 机制能有效地提高吞吐量,定理 1 得证。

定义 2(投递率,Packet Delivery Ratio,PDR) 节点成功收到的数据包总数与节点期望收到的数据包总数的比值。我们用 $RC(\sigma)$ 表示节点 σ 成功接收到的数据包总数,用 $EC(\sigma)$ 表示节点 σ 期望收到的数据包总数,投递率的公式可表示为:

$$PDR = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{RC(\sigma)}{EC(\sigma)} \quad (2)$$

定理 2 在 3.1 节的网络模型中,相同的链路丢包率情况下,ENC 的投递率优于 Loop coding 和 noNC。

证明:设 M 表示拓扑结构中节点的个数, ϵ 表示网络中每条链路的丢包率,则有:

1. noNC 协议下投递率的表达式为:

$$PDR_{nN} = \frac{1-\epsilon}{M} \quad (3)$$

2. Loop coding 协议下投递率的表达式为:

$$PDR_{Loop} = \frac{1-\epsilon \cdot (1-(1-\epsilon)^{M-1})}{M} \quad (4)$$

3. ENC 机制下投递率的表达式为:

$$PDR_E = \frac{1-\epsilon \cdot (1-(1-\epsilon)^{m-1})}{m} \quad (5)$$

在该 ENC 编码机制中,中间节点发送数据包的总数为 m ,且有 $m \leq M$ 。

这里对 3 种协议投递率进行比较分析:

首先由于 $0 < (1-\epsilon)^{M-1} < 1$,因此 $0 < 1 - (1-\epsilon)^{M-1} < 1$,所以 $\epsilon \cdot (1 - (1-\epsilon)^{M-1}) < \epsilon$,即 $PDR_{nN} < PDR_{Loop}$ 。

根据式(4)和式(5),令:

$$f(x) = \frac{1-\epsilon \cdot (1-(1-\epsilon)^x)}{x} \quad (6)$$

对式(6)进行求导得:

$$f'(x) = \frac{[x \cdot \ln(1-\epsilon) - 1] \cdot \epsilon \cdot (1-\epsilon)^x - (1-\epsilon)}{x^2} \quad (7)$$

因为 $\ln(1-\epsilon) < 0$,而且 $(1-\epsilon)^x > 0$,所以

$$[x \cdot \ln(1-\epsilon) - 1] \cdot \epsilon \cdot (1-\epsilon)^x < 0$$

即 $f'(x) < 0$, $f(x)$ 单调递减,又由于 $m \leq M$,因此 $f(m) \leq f(M)$,即 $PDR_{Loop} \leq PDR_E$ 。

综上所述, $PDR_{nN} < PDR_{Loop} < PDR_E$,即在 3 种机制对应的丢包率相同的情况下,ENC 机制的投递率最高,定理 2 得证。

3.3 ENC-RaDio 机制

ENC 机制通过降低冗余包的方法来平衡可解码率与吞吐量,保证可解码率提高的同时尽可能地提高网络吞吐量。然而,在视频数据传输中,不仅要考虑网络吞吐量,更重要的是考虑视频传输的质量优化问题,尽可能地降低视频传输中失真的问题,引入速率控制的方法能够有效平衡该问题,因此本文提出 ENC-RaDio 机制,考虑将速率控制与 ENC 编码机制相结合,兼顾速率与失真率,构造数据包目标函数,比较每个包对应的函数值,选择函数值最小的包发送。

本文将选择发送的包的策略记为 Π ,对包 $T_i \in T$, $\Pi(T_i) = 1$ 表示发送该包, $\Pi(T_i) = 0$ 表示不发送。用 $D(\Pi)$ 表示该策略下视频的失真率, $R(\Pi)$ 表示流的速率,为了找到失真率在期望传输速率下的最小值,本节利用拉格朗日乘子法,引入参数 λ ,将速率与视频失真率联系到一起,数据包目标函数定义为:

$$J(\Pi) = D(\Pi) + \lambda R(\Pi) \quad (8)$$

即需要找到 $J(\Pi)$ 的最小值, 其中:

$$D(\Pi) = \sum_{i=1}^n D(T_i) \quad (9)$$

$$D(T_i) = \gamma(i) \Delta(i) P(\Pi(T_i)) \quad (10)$$

其中, $D(T_i)$ 为发送包 T_i 的失真率; $\gamma(i)$ 是指包 T_i 所在流的优先级(本文均采用视频流, 即 $\gamma(i)=1$); $\Delta(i)$ 是指包 T_i 丢失对视频质量的影响程度, 同文献[16]类似; $P(\Pi(T_i))$ 指在策略 Π 下包 T_i 丢失的概率:

$$P(\Pi(T_i)) = \begin{cases} P\{FTT > \tau\}, & \text{if } \Pi(T_i) = 1 \\ 1, & \text{if } \Pi(T_i) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\tau = \tau_d(j) - \tau_c$, $\tau_d(j)$ 表示包 T_i 传输的截止时间, τ_c 表示当前时间。

$$R(\Pi) = \sum_{i=1}^n R(T_i) \quad (12)$$

$$R(T_i) = \max_{P_j \in T_i} \{B(j)\} \rho(T_i) \quad (13)$$

其中, $R(T_i)$ 是指包 T_i 所在流的速率; $\rho(T_i)$ 是指发送包 T_i 所需要的开销, 若发送包 T_i , $\rho(T_i)=1$, 否则 $\rho(T_i)=0$, 即:

$$\rho(T_i) = \Pi(T_i) \quad (14)$$

综上所述, 式(8)转化为:

$$\min_{\lambda \in (0, 1), \Pi=1} \sum_{i=1}^n (\gamma(i) \Delta(i) P(\Pi(T_i)) + \lambda \Pi(T_i) \max_{P_j \in T_i} \{B(j)\}) \quad (15)$$

ENC-RaDio 机制的核心思想是通过比较期望传输速率下每个包对应的失真率值, 选择失真率最小的包发送。实现该机制的有效方法是将式(15)的函数具体化, 找到最优的包发送。对所有的包 $T = \cup T_i, i \in N$, 均能得到其对应的 λ_i 的值, 选择 λ 值最大的包发送。我们首先定义函数如下:

$$J(T_i) = \gamma(i) \Delta(i) P(\Pi(T_i)) + \lambda \Pi(T_i) \max_{P_j \in T_i} \{B(j)\} \quad (16)$$

若不发送该包 T_i , 则 $\Pi(T_i)=0$, 有:

$$J^0(T_i) = \gamma(i) \Delta(i) P(T_i) \quad (17)$$

若发送该包 T_i , 则 $\Pi(T_i)=1$, 有:

$$J^1(T_i) = \gamma(i) \Delta(i) P(T_i) + \lambda \max_{P_j \in T_i} \{B(j)\} \quad (18)$$

通过比较发送与不发送包 T_i 这两种情况所需要的开销, 来决定是否发送该包 T_i 。

选择的 λ 满足不等式: $J^1(T_i) \leq J^0(T_i)$, 结合式(17)和式(18)可以得出, 每个数据包对应的拉格朗日乘子参数 λ 的计算公式如下:

$$\lambda_i = \frac{\gamma(i) \Delta(i) P(T_i) (1 - P(T_i))}{\max_{P_j \in T_i} \{B(j)\}} \quad (19)$$

将 λ 的最小值表示为:

$$\lambda_{\min} = \min_{i \in N} \lambda_i \quad (20)$$

节点选择 λ_{\min} 对应的包发送。

ENC-RaDio 算法实现过程如下:

ENC-RaDio 算法:

- (1) Initialization: $T_{\max} = \emptyset, \text{Index} = 1$
- (2) for every packet $i=1, 2, \dots, N$ in the intermediate node do
- (3) Calculate all possible coding packets $T_i = P_i \cup \{P_i \oplus c_k\}$
- (4) for $j=1, 2, \dots, |T_i|$
- (5) Calculate $J^1(T_j), J^0(T_j)$ and λ_j of packet T_j with Eq. (17), (18) and (19)
- (6) $\lambda_{\min} = \lambda_{\text{Index}}$

(7) if $\lambda_j < \lambda_{\min}$ and $J^1(T_j) < J^0(T_j)$ then

(8) $\lambda_{\min} = \lambda_j, \text{Index} = j$

(9) end if

(10) $T_{\max} = T_{\max} \cup T_{\text{Index}}$

(11) end for

(12) end for

(13) choose T_{\max} as the sending packets

3.4 算法比较

ENC-RaDio 机制是在 ENC 机制的基础上引入速率控制的方法, 选择期望传输速率下能使失真率最小的包发送, 从而提高视频传输的质量。若利用传统方法将所有的包依次分析比较, 代入失真率计算公式 $D(T_i) = \gamma(i) \Delta(i) P(\Pi(T_i))$ 得到每个包对应的失真率值, 比较选择出失真率最小的包, 最终得到能使视频质量最优的包发送, 需要很大的开销, 时间复杂度为 $O(n) = n(n+1)$; 而本文 ENC-RaDio 机制利用拉格朗日乘子法解决该问题, 找到近似最优值, 时间复杂度为 $O(n) = n$, 与传统方法相比, 节省了大量的时间消耗。

4 性能分析与评价

下面有针对性地设计仿真实验对本文提出的 ENC 机制和 ENC-RaDio 机制进行全面的性能分析和评价。首先介绍仿真环境和参数设计, 然后对实验结果进行分析和讨论。

4.1 实验设计

本文利用 matlab 仿真软件模拟实现 ENC 和 ENC-RaDio 机制, 并将其与 noNC 和 Loop coding 机制进行性能比较。

模拟实验采用环形拓扑结构, 如图 4 所示, 图中转发节点 R 有 6 个邻居节点 N_1, N_2, \dots, N_6 。节点的通信距离是 250m。其中虚线表示节点互相在监听范围之内, 实线箭头表示目的节点为 N_i 的包 p_i 必须通过中间节点 R 转发, 各个包的源节点和目的节点为: $p_1: N_5 \rightarrow N_1, p_2: N_6 \rightarrow N_1, p_3: N_1 \rightarrow N_3, p_4: N_2 \rightarrow N_4, p_5: N_3 \rightarrow N_5, p_6: N_4 \rightarrow N_6$ 。从图 4 中可以看出每个节点中包含的可用的包的队列 (k_i) , 如节点 N_1 中含有的可用包的队列为 $\{p_2, p_3, p_4\}$, 即 $k_1 = \{p_2, p_3, p_4\}$, 因为 N_1 为包 p_3 的源节点, 并且分别从邻居节点 N_2 和 N_6 中监听到包 p_2 和 p_4 。

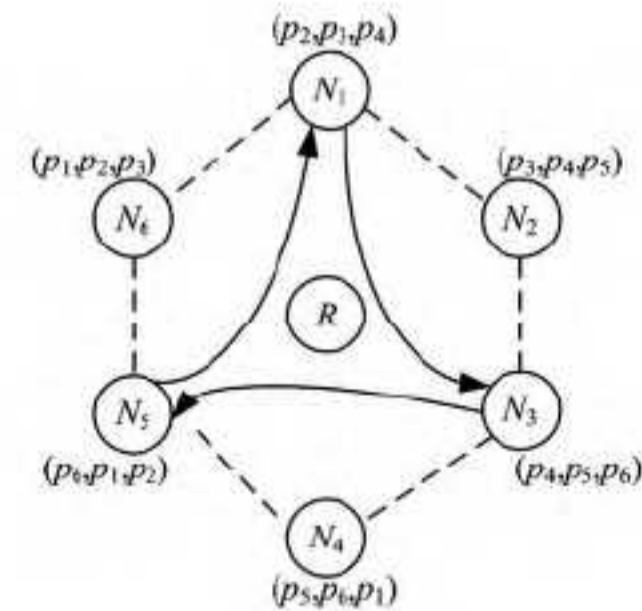


图 4 环形拓扑结构

实验中设置信道数据传输速率为 2Mbps, 数据包大小为 1000 字节。实验分别比较了 4 种协议的视频帧的可解码率以及网络吞吐量。

4.2 结果分析

图 5 显示了 noNC、Loop coding 与 ENC 3 种编码机制投递率的对比情况。随着链路丢包率的增加, 3 种机制的投递率呈下降的趋势, 如图 5 所示, noNC 协议下投递率呈线性下

降,与式(3)一致;Loop coding 协议的投递率略高于 noNC,而 ENC 编码机制投递率较 No coding 和 Loop coding 协议有显著提高,满足定理 2。

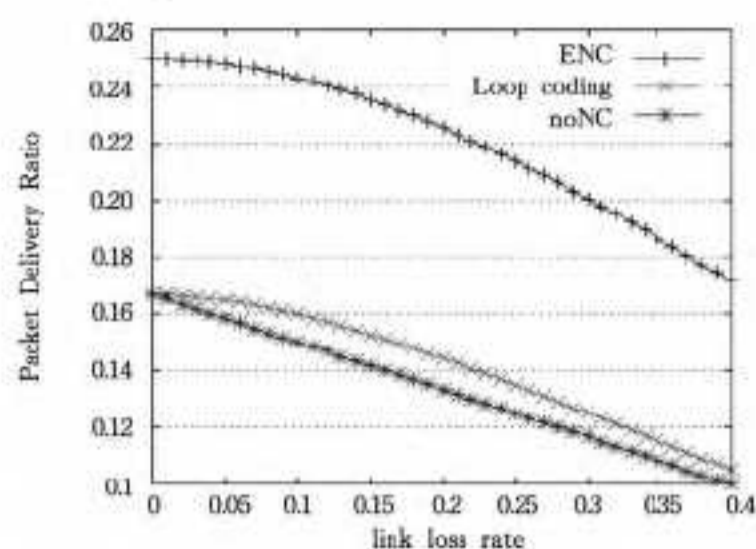


图 5 在丢包环境下 3 种协议投递率的比较

另外,从图 5 中可以看出,虽然 ENC 机制的投递率较 Loop coding 和 noNC 均有所提高,但其总体投递率仍然较低,只有 22%左右,对此机制可以进一步改进,因此,本文提出 ENC-RaDio 机制。

实验中用成功解码出数据包的概率来衡量可解码率。图 6 为环形拓扑结构下 4 种机制的可解码帧率对比情况。ENC-RaDio-L 表示采用拉格朗日乘子法的 ENC-RaDio 机制,ENC-RaDio-noL 表示没有采用拉格朗日乘子法的 ENC-RaDio 机制,ENC-RaDio 机制采用基于速率控制的网络编码策略。考虑在尽可能平衡可解码率与吞吐量的同时,兼顾到视频失真率的控制,使综合效用最高的数据包优先发送,从而其总的可解码帧率较 noNC、Loop coding 和 ENC 机制都有显著提高。如图 6 所示,ENC-RaDio-L 机制的可解码率略低于 ENC-RaDio-noL,这是由于 ENC-RaDio-noL 机制将所有的包一个一个进行计算分析,选出最优的包发送。但通过 3.4 节的理论分析可知,ENC-RaDio-L 机制大大降低了时间复杂度,节约了大量的计算开销。

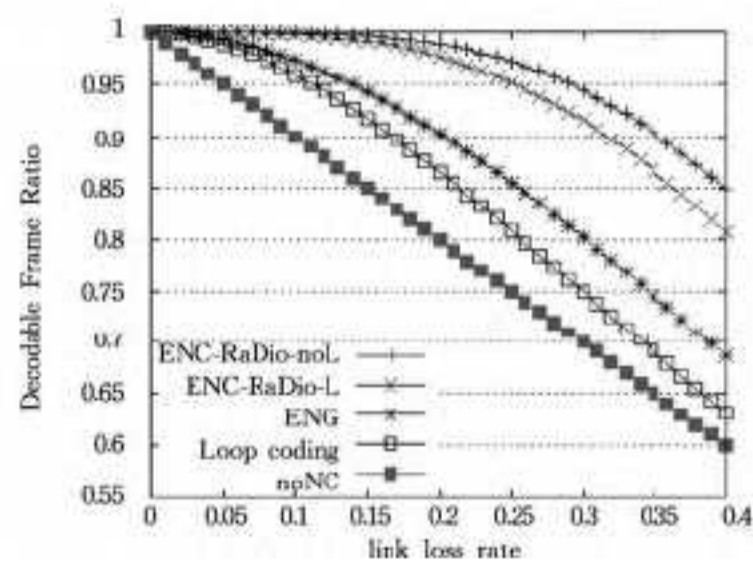


图 6 各协议视频帧可解码率对比

另外,从图 6 中亦可看出,与 ENC、Loop coding 以及 noNC 机制相比,ENC-RaDio-L 和 ENC-RaDio-noL 机制获得了更高的可解码帧率,当丢包率为 25% 时,ENC-RaDio-noL 和 ENC-RaDio-L 机制的可解码帧率分别达到了 97.2% 和 95.2%,均高于 ENC(85.5%)、Loop coding(80%) 和 noNC(75%) 的可解码帧率。原因在于,ENC-RaDio 机制选择数据包综合效益最优的包发送,且每个目的节点均有两种以上的解码方式,增加了数据包的可解码率。

图 7 显示了有链路损耗的网络环境中 4 种协议的网络吞吐量的对比。与可解码率类似,ENC-RaDio 机制的网络吞吐量同样高于其他几种协议,如图 7 所示,ENC-RaDio 机制的吞吐量达到了 1069600pkts。较 ENC 机制,其吞吐量增益为 25% 左右,较 Loop-coding 和 noNC 协议,其吞吐量的增益为

50% 左右,性能差异更为明显。原因在于,ENC-RaDio 机制根据数据包的特性,给低视频失真率数据包及高可解码帧率的数据包分配了更高的优先级,使其更容易接入信道,在提高视频帧的可解码率的同时,最大化了网络吞吐量。

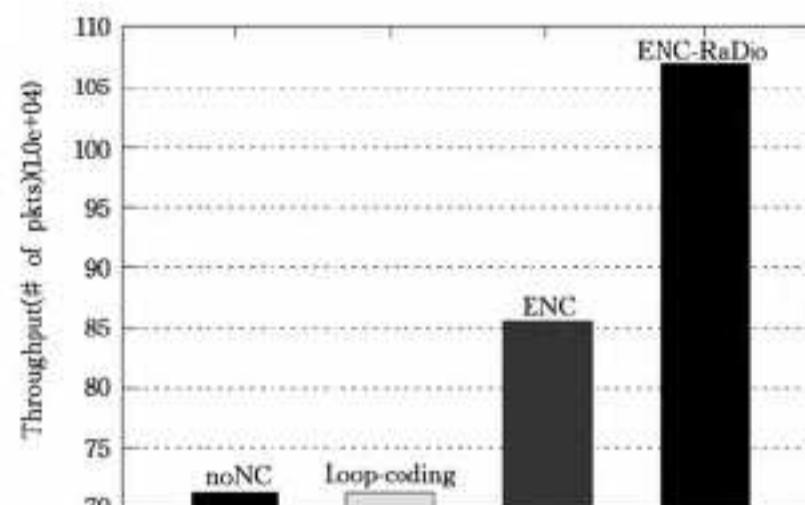


图 7 不同协议下网络吞吐量的比较

结束语 本文提出了效率优化的网络编码机制(ENC),并针对视频数据传输的特点,在 ENC 机制的基础上,进一步提出了基于速率控制的效率优化网络编码机制(ENC-RaDio)。该机制将速率控制与网络编码协议相结合,利用拉格朗日乘子法构造了关于速率与失真率的数据包目标函数,以此判断数据包发送与否。ENC-RaDio 机制转发期望传输速率下失真率最低的数据包,应用于存在丢包的无线网络环境中,能够保证数据传输的可靠性,在一定程度上改善视频传输的质量,其性能较经典的丢包感知网络编码(CLONE)协议有明显的提高。由于无线多媒体业务不仅对链路的质量比较敏感,而且对实时性要求更加严格,因此,接下来的工作会涉及这方面内容并对此进行研究。

参考文献

- [1] 沈航,白光伟,赵露,等.多跳无线网络中具有时间意识的视频流控制协议[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(5):808-813
- [2] Bai G, Tao J, Shen H. A Link-lifetime based Dynamic Source Routing Protocol (LTDSR) for Multimedia over MANETs[J]. Journal of The Chinese Institute of Engineers, 2010, 33(5): 761-768
- [3] Dai Rui, Wang Pu, Akyildiz I F. Correlation-Aware QoS Routing With Differential Coding for Wireless Video Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(5): 1469-1479
- [4] Abouei J, Bayesteh A, Khandani A K. On the Delay-Throughput Tradeoff in Distributed Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on information theory, 2012, 58(4): 2159-2174
- [5] Matsuda T, Noguchi T, Takine T. Survey of Network Coding and Its Applications[J]. IEICE Transactions on Communications, 2011, E94. B(3): 698-717
- [6] Ahlswede R, Cai N, Li S R, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1206
- [7] Chi Kai-kai, Jiang Xiao-hong, Horiguchi S. Joint Design of Network Coding and Transmission Rate Selection for Multihop Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2010, 59(5): 2435-2444
- [8] Chou P, Miao Z. Rate-distortion optimized streaming of packetized media[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(2): 390-404
- [9] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]// Proceedings of ACM SIGCOMM. Pi-

[10] Le Ji-lin, Lui J C S, Chiu Dah-ming. DCAR: Distributed Coding-Aware Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing(S1063-6927), 2010, 9(4): 596-608

[11] 陈贵海, 李宏兴, 韩松, 等. 多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1908-1919

[12] Yan Yan, Zhang Bao-xian, Zheng Jun, et al. CORE: A Coding-Aware Opportunistic Routing Mechanism for Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Wireless Communications(S1536-1284), 2010, 17(3): 96-103

[13] Jian zhang, Chen Yuan-zhu, Marsic I. MAC-layer Proactive Mixing for Network Coding in Multi-hop Wireless Networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2): 196-207

[14] Seferoglu H, Markopoulou A. Video-Aware Opportunistic Network Coding over Wireless Networks[J]. IEEE Journal on selected areas in Communications(S0733-8716), 2009, 27(5): 713-728

[15] Rayanchu S, Sen S. Loss-aware network coding for unicast wireless sessions: design, implementation, and performance evaluation[C]// Proceedings of the 2008 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York, USA, 2008: 85-96

[16] Liang Y J, Apostolopoulos J G, Girod B. Analysis of packet loss for Compressed Video: Does Burst-Length Matter? [C]// Proceedings of IEEE ICASSP (S1520-6149). Hong Kong, April 2003(5): 684-687

(上接第 272 页)

看出不同带宽下 LW-WFQ 算法的丢包率都小于 WFQ 算法。

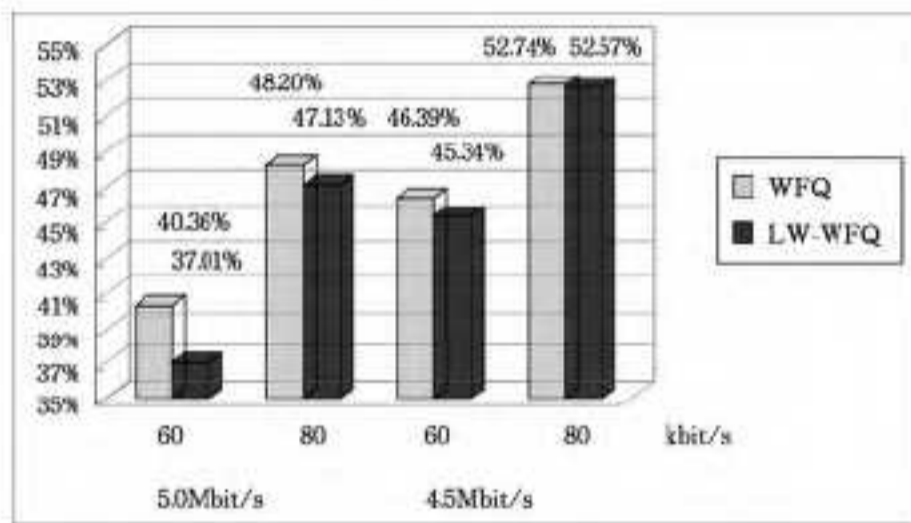


图 8 不同链路带宽和突发速率下两种算法的丢包率对比

从上面的仿真图中我们发现 LW-WFQ 在业务流出现突发的情况下性能比 WFQ 要好。这是因为 WFQ 在面对业务流突发的时候没有采用其他的调整策略,导致了网络拥塞加剧;LW-WFQ 通过队长和权值的双重调整在出现突发时进行了短暂的调整便进入了比较稳定的状态,并且性能优于 WFQ。实验带宽分别为 5.0Mbit/s(带宽充足)和 4.5Mbit/s(带宽不足)两种情况,当突发速率为 60kbit/s 时,算法性能改进比较明显;当突发速率为 80kbit/s 时,无论带宽是哪种状态,LW-WFQ 在延迟和抖动性能上都与 WFQ 性能相近,这说明算法的处理能力有一个范围,当超出范围的时候算法将失去效果。

结束语 LW-WFQ 通过对业务流实时性的分类克服了 WFQ 算法不区分会话优先级的缺陷。当存在实时性业务流时,首先考虑实时业务的延迟需要,通过添加自适应队列管理器对业务流的最大队长进行调整,尽可能满足实时业务的 QoS 要求。同时,LW-WFQ 算法在应对实时性业务流突发的策略上增加了权值的调整,降低了分组的虚拟结束时间,争取改变分组在流间排队等待的位置,加速分组的转发。权值调整策略中最大队长读取的值是自适应对列管理器实时调整的最大队长,所以在面对业务流突发的时候,权值的改变是根据当时的网络情况进行动态调整,不是固定不变的,充分地达到了队长和权值动态结合的目的。此外,在整个转发的过程中 LW-WFQ 没有侵占非实时性业务流的带宽,严格按照业务流初始的权值进行带宽的分配,保证了流间的友好性。从实验仿真结果可以看出,LW-WFQ 算法能够较好地控制实时业务

流的延迟和抖动,降低了链路丢包率,改进了实时业务流的 QoS 性能。

参考文献

[1] 杨永斌,唐亮贵. 队列调度算法在网络中的应用研究[J]. 计算机科学, 2005(7): 56-58

[2] 徐昌彪,鲜永菊. 计算机网络中的拥塞控制与流量控制[M]. 北京,人民邮电出版社, 2007

[3] 尹德斌,谢剑英. 一种新的加权公平队列调度算法[J]. 计算机工程, 2008(4): 28-30

[4] Bennett J C R, Zhang H. Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(5): 675-689

[5] Martinez R, Alfaro F J, Sánchez J L. Evaluating several implementations for the AS minimum bandwidth egress link scheduler [C]// 15th International Conference on Computer Communications and Networks, 2006(ICCCN 2006). IEEE, 2006: 169-176

[6] 许玲. 基于漏桶+WFQ 的 QoS 调度策略分析[J]. 微机发展, 2003(8): 98-100

[7] 王云涛,方建安,张晓辉,等. 基于 TCP Vegas 的网络拥塞控制改进算法[J]. 计算机应用研究, 2009(12): 4645-4647

[8] 董雪源,王晓茹. 用于电力系统信息综合传输的改进加权公平队列调度算法[J]. 中国电机工程学报, 2012(22): 149-156+6

[9] 王红民. 多决策树分类的队列调度算法研究[D]. 郑州,河南工业大学, 2011

[10] 许孙娟,叶家骏,邹君妮. 一种基于优先级共享带宽的加权公平排队算法[J]. 上海大学学报,自然科学版, 2006(2): 1-4

[11] 闵捷,周红琼,王晓东. 一种基于优先级的加权公平队列调度算法[J]. 宁波大学学报,理工版, 2012(2): 42-46

[12] Magana E, Morato D, Varaiya P. Tuning the weights in WFQ schedulers for the maximization of carried best effort traffic[C]// 10th International Conference on Telecommunications, 2003. Piscataway, N J: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003: 917-922

[13] 张伟. 集成服务网络中具有 QoS 支持的分组公平调度算法的研究与实现[D]. 长春,吉林大学, 2004

[14] 李苗,李冬妮,王光兴. 确保 EF 业务服务质量的新型路由结构[J]. 计算机科学, 2004(10): 32-34