

数据速率匹配的网络编码优化机制

董赞强^{1,2}, 沈苏彬^{2,3}, 毛燕琴³

(1. 郑州航空工业管理学院 计算机科学与技术系, 河南 郑州 450015; 2. 南京邮电大学 信息网络技术研究所, 江苏 南京 210003;
3. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

摘要:提出了一种基于数据速率匹配调整的网络编码优化机制 OMNR, 通过对关联数据速率的线性规划函数的描述及控制网络数据传送转发状态的数据票参数的引入, 机制在基于网络编码的多径路由上实现了数据速率的匹配编码; 基于对反映目的节点数据解码状态的数据批次解码时延的概率检测, OMNR 机制实现了多径路由上数据速率的匹配调整。在 OMNR 机制的数据传送中, 路由选择中数据往返时延和网络编码中数据传送确认信息的实时测量在很大程度上保证了编码数据传送的可靠性。理论分析和模拟实验证明了模型的有效性和可靠性。

关键词: 网络编码; 编码机会; 速率匹配; 数据传送可靠性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)11-0100-12

Optimization mechanism for network-coding based on rate-match

DONG Zan-qiang^{1,2}, SHEN Su-bin^{2,3}, MAO Yan-qin³

(1. Department of Computer Science and Application, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;
2. Institute of Information Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
3. School of Computer Science & Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The network coding optimization mechanism OMNR (optimization mechanism for network-coding based on rate-match) was proposed. The mechanism achieves the rate match solution of the linear programming function on data transport rate and the introduction of the data ticket parameter in coding-aware multi-path routing. And the dynamic adjustment on rate match process was achieved by the probability detection of the decoding delay of data generation that reflects data decoding state in destination nodes. The real-time measurement on the data transport round-trip delay in routing selection and acknowledgement information in network coding guarantees the data transport reliability. Theoretic analysis and simulation show the validity and reliability of the model.

Key words: network coding; coding opportunity; rate match; data transport reliability

1 引言

随着通信网络技术的快速发展和广泛应用, 针对网络数据传送性能的要求不断提高, 如何有效地利用现有网络资源提高网络数据传送性能成为网络通信研究的一个重要问题。网络编码作为一种融

合编码与路由的信息交换技术, 为解决这一问题提供了一种途径。通过允许网络中间节点对传送的数据进行编码组合操作, 而不再局限于对数据的存储转发操作, 网络编码在提高网络吞吐量和带宽资源利用率, 以及均衡网络流量负载等方面改善了网络数据传送性能, 被认为是进入 21 世纪后信息处理

收稿日期: 2012-09-06; 修回日期: 2013-01-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2011CB302903); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2006AA01Z208); 江苏省科技支撑计划基金资助项目(BE2009157); 网络与交换技术国家重点实验室开放基金资助项目(SKLNST-2008-1-13)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China(973 Program 2011CB302903); The National High-Tech Research and Development Program of China(863 Program)(2006AA01Z208); The Science and Technology Pillar Program of Jiangsu Province(BE2009157); The Opening Project of State Key Laboratory of Networking and Switching Technology of China(SKLNST-2008-1-13)

和传输理论研究中的重大突破，其理论价值和应用前景受到了学术界的广泛关注^[1-5]。

在网络编码应用中，当网络中具有不同速率的数据流到达编码节点并进行编码组合操作时，传送速率较大的数据流在编码节点将出现大量因缺少编码匹配分组而无法编码的分组，对此，为提高编码机会，这些数据分组将继续等待其编码匹配数据流分组的到达或通过虚拟链路切换到流内网络编码机制^[6,7]，或者为避免产生过大等待时延，未获得编码的数据分组将在编码节点以传统网络数据存储—转发模式直接进行转发^[8]。针对上述因数据速率差异造成较低的网络编码机会以及产生的系列调整机制，本文探讨如何直接对编码中数据速率进行匹配控制，从而在最大程度上实现网络编码中数据速率的匹配编码，增大网络编码机会，提高编码增益。鉴于网络拓扑空间多样性对提高网络数据传送可靠性的显著作用^[9,10]，尤其是在多跳无线网络环境中，利用节点间的协同机制建立数据多径传送通信子网，实现通过网络拓扑空间的冗余设计提高网络数据传送的可靠性。同时通过网络编码的应用，实现网络数据的智能处理，改善网络数据的传送性能、网络编码与多径路由协议结合形成的编码感知(coding-aware)多径路由将更为显著地提高网络数据传送的性能。因此，本文将在编码感知多径路由协议的基础上探讨网络编码中数据速率的匹配控制问题。

在数据流编码过程中，网络协议方案采用何种规则对多条路径上的数据速率进行匹配控制是一个重要问题，影响到数据分组的编码状态及调度转发策略，是网络编码研究中面临的一个重要问题。对此，现有研究工作主要表现在：KIM T S 等在文献[11]中针对“蝶型”网络拓扑结构中的数据速率匹配问题进行了探讨，其通过数据解码概率的描述讨论了编码中数据传送速率匹配的重要性，但具体的数据速率匹配调整过程仍需进一步探讨；ROH H T 等在文献[12]中针对三点线性网络拓扑结构提出了一种基于网络编码的数据流转发控制模型，为探讨编码中数据速率匹配问题提出了启发性的解决方案，但作者未对方案的有效性进行必要的分析；YAN Y 等在文献[13]中探讨了无线 mesh 网中基于数据速率匹配的编码感知路由(CNCR)协议，协议定义了关联数据速率的路由选择参量，进而探讨构建基于网络编码的多径路由协议，不足的是协议仅给出问题的定性描述，未对编码过程中数据速率匹配方案进行具

体阐述；SHRADER B 等在文献[14]中对多径编码感知路由协议中的数据传送控制模型进行了探讨，以数据速率为参量对单径路由、多径洪泛和编码感知多径路由由数据传送模式下的网络吞吐量进行分析描述，提出参数确定性和概率统计性的多径路由数据速率控制分配机制，同样，机制的具体实现过程及有效性仍需进一步探讨；另外，文献[15,16]分别针对一些具体网络拓扑结构对编码环境中数据速率的分配控制问题进行了一些探讨，研究多针对局部特殊的网络拓扑结构(蝶型拓扑或三点线型拓扑等)，相关模型对多跳网络拓扑结构的扩展性仍需继续讨论，且这些研究未考虑多跳无线网络的状态特点，尤其是针对网络拓扑结构的动态时变性设计相应的机制，本文研究的内容将有效地解决多跳无线网络中数据速率的匹配编码问题。上述一些研究工作为本文的研究提供了坚实的基础，基于对上述研究中不足方面的分析，本文提出了一种基于数据速率匹配调整的网络编码优化机制(OMNR, optimization mechanism for network-coding based on rate-match)，机制探讨在基于网络编码的多径路由上对数据速率进行动态调整控制，以实现数据速率的匹配编码。其中，编码感知多径路由上数据速率的匹配过程通过关联数据速率的线性规划模型及数据票(packet ticket)参量实现，而为实现编码中数据速率的动态调整匹配以及保证目的节点有效地解码出原始数据，本文从目的节点数据解码时延(目的节点接收到相关数据批次的第一个分组到其完成整个数据批次分组解码之间的时间)方面进行分析，通过在目的节点建立关联数据速率的解码时延概率模型实现对数据速率匹配控制结果的实时测量，最后，通过数据传送确认信息的“携带(piggyback)”传送，速率匹配调整信息被传向网络中间节点及源节点，以此实现网络编码过程中数据速率的匹配控制。

2 网络模型及问题描述

在图 1 所示的网络模型中，设网络中存在 3 种数据流 f_1 、 f_2 、 f_3 ，其中， f_1 由节点 1 传向节点 10，数据速率为 1.5 Mbit/s， f_2 由节点 1 传向节点 9，数据速率为 0.5 Mbit/s， f_3 由节点 2 传向节点 9，数据速率为 2 Mbit/s，网络链路带宽为 2 Mbit/s。分析下述 3 种网络数据传送情况。情况 1：网络采用传统数据存储—转发策略(节点不对数据进行编解码操作)，当 f_3 沿路径 $P_3^1(2, 4, 7, 9)$ 或路径 $P_3^2(2, 4, 6, 9)$ 传送时，

由于存在瓶颈链路(4,7)或(6,9), f_3 与 f_1 或 f_2 不能同时传送,这造成较低的网络吞吐量。情况2:为解决情况一中网络瓶颈链路问题,采用网络编码技术, f_1 沿路径 $P_1^1(1,4,7,10)$ 以1.5 Mbit/s 速率传送, f_3 沿路径 $P_3^1(2,4,7,9)$ 以2 Mbit/s 速率传送, f_1 和 f_3 在节点4进行编码,在节点7进行解码,数据速率匹配编码值为1.5 Mbit/s ; f_2 沿路径 $P_2^1(1,3,6,9)$ 以0.5 Mbit/s 速率传送, f_3 沿路径 $P_3^2(2,4,6,9)$ 以2 Mbit/s 速率传送, f_2 和 f_3 在节点6进行编码,在节点9进行解码,数据速率匹配编码值为0.5 Mbit/s。在情况2中, f_3 的数据无法在编码节点达到充分的编码,尤其是当 f_2 和 f_3 在节点6以0.5 Mbit/s 的数据编码匹配速率进行编码时, f_3 中的分组不能取得最大程度的编码匹配,网络编码的优势得不到充分发挥。对此,考虑情况3:若在编码过程中引入数据速率匹配编码机制,使得 f_3 沿路径 $P_3^1(2,4,7,9)$ 以1.5 Mbit/s 速率传送,这样 f_3 中的数据分组可与沿路径 $P_1^1(1,4,7,10)$ 以1.5 Mbit/s 速率传送的 f_1 中的数据分组在节点4实现最大程度的编码匹配;同时,使 f_3 沿路径 $P_3^2(2,4,6,9)$ 以0.5 Mbit/s 传送, f_3 中数据分组可与沿路径 $P_2^1(1,3,6,9)$ 以0.5 Mbit/s 速率传送的 f_2 中的数据分组在节点6取得最大程度的编码匹配。这使得各数据流分组在编码过程中取得最大的网络编码匹配,具有最大的网络编码机会。由情况3知,针对网络各数据流,编码感知路径的选择及路径上各编码数据流数据速率匹配编码的设定,是实现网络中各数据流分组充分编码的关键。OMNR 机制正是从这一关键方面探讨实现网络数据充分编码转发的途径,以此推进网络编码的深入研究及实用化发展。图2表示在上述3种情况下, f_2 和 f_3 在编码节点6取得数据速率匹配编码的模型图(图2中 f_{23} 为编码数据流),图2所示描述当 f_2 和 f_3 具有编码匹配的数据速率时,其在编码节点6具有相等的队列长度,这为各编码数据流分组的充分编码创造了条件。

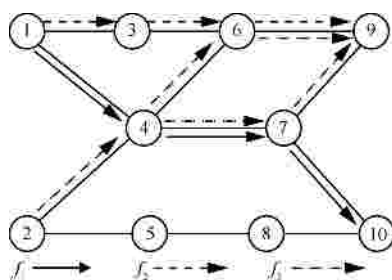


图1 多径路由网络拓扑结构

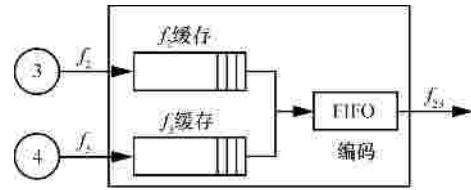


图2 f_2 与 f_3 在节点6的数据速率匹配编码

上述网络中数据速率匹配编码问题体现了2个方面的研究。1) 编码感知路径的建立和数据速率的控制分配,OMNR 机制为网络数据流建立多条编码感知传送路径,各数据流在不同路径上的速率依据2个参量设定: 路径上与之编码匹配的数据速率,这在路由发现过程中确定; 路径上链路的通信状态及路径上节点的资源(带宽)状态。如此使得网络中间节点将依据编码匹配数据速率信息及节点本地资源信息对数据以设定的速率比例进行转发,实现网络编码过程中数据速率的匹配编码以及网络流量负载的均衡,提高了网络数据传送的可靠性。2) 针对多跳无线网络链路状态的时变性,OMNR 机制以数据批次成功解码时延为参量分析目的节点数据解码状态,通过对数据解码时延统计量的分析实现多跳无线网络中数据速率匹配值的动态调整,以此使 OMNR 机制在状态时变的多跳无线网络环境中具有较强的自适应性。

3 OMNR 机制描述

3.1 基本思路

OMNR 机制设计的目的是最大程度上提高网络编码机会(编码机会描述为节点对接收的数据执行一次编码操作的过程),机制主要从网络数据速率匹配控制的角度探讨提高网络编码的机会,以数据速率为对象研究网络编码过程中数据速率的匹配编码问题。机制主要包含编码感知多径路由的建立、网络编码增益与数据速率之间线性规划模型的建立和数据速率匹配调整三部分,其中,后两部分是本文工作的核心。三部分的具体研究过程为:1) 编码感知多径路由的建立是 OMNR 机制的基础,可依据传统路由协议机制(如 AODV 路由协议)及现有的编码感知路由协议研究^[13,15,17]进行构建,本文在机制组成描述中给出简要论述;2) OMNR 机制通过引入线性规划目标函数建立关联数据速率的数据传送成本—效益函数,基于对线性规划目标函数的求解取得网络编码过程中数据速率的匹配计算,结合数据速率匹配值,通过数据票参量的引入在多

路径上实现数据速率的匹配控制; 3) 考虑到多跳无线网络链路状态的时变性及不可预测性, 为提高编码中数据速率匹配控制的有效性, OMNR 机制引入了速率匹配调整过程, 过程基于信息反馈机制, 通过目的节点周期性地对编码数据解码时延的实时测量实现数据速率的匹配调整。

3.2 OMNR 机制组成

3.2.1 编码感知多径路由的建立

OMNR 机制的初始路由发现过程与 AODV 路由协议的路由发现过程相似, 但在下述 2 个方面对 AODV 路由协议进行了改进: 1) 在重复(已被接收过)RREQ 报文处理中, OMNR 机制保留重复 RREQ 报文, 比较重复 RREQ 报文中路径跳数信息与节点路由表中路径跳数信息, 若前者相对较小, 则机制转发重复 RREQ 报文, 否则, 重复 RREQ 报文被直接丢弃; 2) 在解决 RREQ 报文广播风暴的问题上, OMNR 机制借助节点 GPS 信息及节点位置信息使得 RREQ 报文的广播传送限制在源节点与目的节点之间某设定的区域, 以此减小 RREQ 报文的广播风暴影响。当可能来自不同路径的 RREQ 报文到达目的节点 d 时, d 依据设定的路径优化选择参量(端到端数据传送时延和编码节点量)选择 L 条路径 p_l ($0 < l \leq L$, L 由路径优化选择参量的阈值和 RREQ 报文中的路由发现计时器控制), 即 $\{p_l | (RTT(p_l) < T_0) \wedge (CN(p_l) < cn_0)\}$ ($RTT(p_l)$ 为传输路径为 p_l 的 RREQ 报文的传输回路时延(s 发送 RREQ 报文到 s 接收到 RREQ 报文对应的 RREP 报文的时间差; $CN(p_l)$ 为第 l 条路径 p_l 上的潜在编码节点数), T_0 、 cn_0 为阈值量, 依据应用需求设定)。在上述路径建立的过程中, 存在一个关键点是 d 对接收到的 RREQ 报文首先进行超时检测, 仅当 RREQ 报文计时器未超时时, d 即执行路径选择操作及通过 RREQ 传送中建立的反向路径向 s 发送 RREP 报文(RREP 报文包含 p_l 信息)。

上述编码感知路径建立过程包含 2 个重要参量, 即 $RTT(p_l)$ 和 $CN(p_l)$, 前者可通过 RREQ 报文及对应的 RREP 报文中的时标域获取; 对于后者 $CN(p_l)$, OMNR 机制主要通过通过对 Hello 报文的修改和对节点接收到的分组信息的分析取得 $CN(p_l)$ 值, 其中, 对用于维护网络一跳拓扑信息的周期性 Hello 报文的修改表现为在 Hello 报文结构中添加相关信息域(如节点一跳及两跳邻节点信息域等), 如此在一定网络检测周期内, 通过对 Hello 报文附加信息和节

点接收信息的联合分析, 网络节点 c 可推知一跳及两跳邻节点信息, 进而可判断编码状态信息, 即 c 依据编码条件^[17]计算其编码标识 $CN(c)$ (若节点 c 满足编码条件之一, 则 $CN(c)=1$, 否则, $CN(c)=0$)。网络中 d 通过 RREQ 报文中的编码节点域计算 $CN(p_l)$ ($CN(p_l) = \sum_{c \in p_l} CN(c)$), 实现编码感知多径路由

的建立及选择。

3.2.2 数据速率匹配过程描述

OMNR 机制中的数据速率匹配编码过程体现在 2 个方面。1) 在编码感知多径路由发现过程中, 源节点 s 获得多条通向目的节点 d 的路径 p 及 p 上的编码节点量 $CN_f(p)$, s 比较各路径的 $CN_f(p)$ 并选择 K' ($K' \leq L$) 条路径 (K' 依据参与编码的数据速率状态进行启发式设定, 启发式设定包括两方面含义:

路由发现中备选路径数 L 因网络状态变化而变化, 因此, K' 无法准确设定; 整个网络数据流速率状态无法准确描述, 这也使得 K' 难以准确设定。OMNR 机制主要考虑影响 K' 的数据流速率因素, 即若网络中各数据流传输速率差值较大时, K' 取接近 L 的相对较大的值; 反之, K' 取相对较小值。具体运算中, K' 初始化为 L 值, 其后进行递减设定。 K' 描述了数据流量分割的粒度), 数据流 f 在 K' 中具有不同优先级的路径 p 上以 s 分配的匹配速率值进行传送, 且 f 在 K' 条路径 p 上分配的速率取决于 p 上待编码的匹配数据速率和 p 上瓶颈节点的最大数据传送速率, 以及网络链路的容量。同时, 路径数量 K' 值依据网络数据传输状态反馈信息实时调整。2) s 通过固定周期内数据票量 $r_{ij}^f(t)$ 控制分组在网络链路及路径上的发送速率, 数据票描述为一种数据传送指示信息, 且可在分组头设置相应字段域实现分组对数据票的携带传送。 $r_{ij}^f(t)$ 表示时间片 t 内由节点 i 传送到节点 j 的数据票, 数据票一一对应于传送的数据分组, 伴随数据分组的传送产生, 由分组携带传送。上述 2 个方面体现 OMNR 机制从网络链路状态 Y 和编码数据流状态 X 的综合描述角度分析目前网络编码机制的优化问题, 以在最大程度上改善网络数据传送性能。

数据速率匹配的目的在于在编码过程中取得最大的网络编码机会, 编码机会的提高将实现网络数据传输量的减少, 进而降低网络数据传送成本。对于流间网络编码, 当网络拓扑结构相对稳定时, 网络编码机会的大小取决于数据分组在编码节点

的编码程度，而编码数据流在编码节点的数据速率匹配状态在较大程度上影响了数据的编码程度。基于此，本文通过探讨数据速率与数据传输量之间的关系，建立关联数据速率的网络成本效益函数，取得对网络编码增益的间接描述，从网络数据流及链路状态角度探讨一种新的网络编码的优化技术。基于上述思路，本文构建关联数据速率和网络数据传送成本的线性规划模型，通过对线性规划模型的具体分析求解网络编码过程最优的数据速率匹配值。具体过程为：设不同路径 p 上数据流 f_i 的数据速率为 x_i^p ，且满足 $\sum_{p \in P_i} x_i^p = x_i$ ($x_i^p \in x_i, x_i \in X$ ， $x_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{|P_i|}\}$ ， $X = [x_1, x_2, \dots, x_F]$ ， P_i 为 f_i 流经的路径集， F 为数据流集)，链路 (n_i, n_j) 对应的数据传输率为 a_{ij} (a_{ij} 定义为节点 n_i 与 n_j 之间的分组提交率，同时，从网络链路上数据重传和数据传送功率等实际网络因素角度分析变量 a_{ij} ， a_{ij} 的物理意义同时反映了分组在链路 (n_i, n_j) 上的传送成本)，对于路径 $p(n_i, n_k, n_j)$ 及路径 $q(n_i, n_k, n_j)$ (n_k, n_j 分别为编解码节点)，当在网络中引入网络编码技术时，在路径 p 、 q 上以 x_i^p 、 x_j^q 传送的数据流产生的数据传送成本为

$$C_{n_k}(X_k, Y_k) = \max\{a_{ik}, a_{i'k}\}y_k + a_{ik}(x_i^p - \min\{x_i^p, y_k\}) + a_{i'k}(x_j^q - \min\{x_j^q, y_k\}) = a_{ik}x_i^p + a_{i'k}x_j^q - T_{n_k} \quad (1)$$

式(1)描述两条数据流在编码节点上产生的传送成本。其中， X_k 、 Y_k 描述网络当前负载量和网络当前数据传送状态量，其分别用数据流速率向量和编码节点上编码数据流最大传送速率向量表示； $a_{ik}x_i^p + a_{i'k}x_j^q$ 描述在以数据传输量为度量的基础上，网络未引入网络编码技术时的数据传送成本， T_{n_k} ($T_{n_k} = a_{ik} \min\{x_i^p, y_k\} + a_{i'k} \min\{x_j^q, y_k\} - \max\{a_{ik}, a_{i'k}\}y_k$) 描述网络在引入网络编码技术后减小的成本量； y_k 为编码节点 n_k 上编码数据流的最大传送速率，其描述了对于网络中经过编码节点的任一数据流，因数据速率匹配而达到充分编码，或在速率匹配编码机制后达到部分编码，且部分编码的数据流速率由编码速率 y_k 和非编码数据速率组成，同时，在某一网络检测周期内，若编码节点 n_k 为某一数据流对应路径的瓶颈节点，则 y_k 为该路径对应的数据速率匹配编码值。考虑到网络中多数据流在共

享路径上的传送，对式(1)描述的网络数据编码传送成本函数进行扩展，整个网络系统的数据编码传送成本描述为

$$C(X, Y) = \sum_{f_i \in F} \sum_{p \in P_i} (q_i^p x_i^p - T) \quad (2)$$

其中， $T = \sum_{k \in CN_p} (a_{ik} \min\{x_i^p, y_k\} - (\max a_{ik})y_k)$ ($\max a_{ik}$ 表示编码节点 n_k 和其邻节点 n_i 之间的最大数据传送成功率)， q_i^p 和 CN_p 为 f_i 在 p 上的传送成本 (a_{ij}) 向量和编码节点集，同时，分析到 n_k 所在路径的当前可用容量 y_p 的约束， f_i 中编码数据及非编码数据的传送速率应满足 $\sum_{f_i \in F} x_i^p \leq y_p$ ，且由式(2)可知，若要取得网络数据传送成本的最小值，则在满足网络链路容量限制的条件下，网络数据速率匹配编码值应取得最大值，即式(2)中参量 T 取最大值，以线性规划模型表示。

$$\max \sum_{f_i \in F} \sum_{p \in P_i} T \quad (3)$$

$$\text{s.t. } y_p - \sum_{f_i \in F} x_i^p \leq 0 ; x_i - \sum_{p \in P_i} x_i^p = 0 \quad (4)$$

为使式(3)中目标函数具有连续可微性，以便求解编码过程数据速率最优匹配值及简化复杂运算，OMNR 机制选取 m 均值函数近似描述参量 $\min\{\cdot\}$ (参量 m 在较大程度上决定了近似运算中的误差量，因此， m 主要依据关联网络数据流速率偏差状态的专家知识库进行设定，专家知识库依据网络实际应用状态设定)，应用 Lagrangian 乘子法求解最优 x_i^p 。

$$L(x, l_1, l_2) = \sum_{f_i \in F} \sum_{p \in P_i} T + l_1(y_p - \sum_{f_i \in F} x_i^p) + l_2(x_i - \sum_{p \in P_i} x_i^p) = \sum_{f_i \in F} \sum_{p \in P_i} \sum_{k \in CN_p} (a_{ik} \left(\frac{(x_i^p)^m + (y_k)^m}{2}\right)^{\frac{1}{m}} - (\max a_{ik})y_k) + l_1(y_p - \sum_{f_i \in F} x_i^p) + l_2(x_i - \sum_{p \in P_i} x_i^p) \quad (5)$$

对于式(5)中的 Lagrangian 算式，应用次梯度运算方法求得路径 p 上数据流 f_i 的速率

$$x_i^p(t+1) = [x_i^p(t) + q_0(t) \frac{\partial L(x, l_1, l_2)}{\partial x_i^p}(x_i^p(t))]^+ \quad (6)$$

$$l_i(t+1) = [l_i(t) + q_i(t) \frac{\partial L(x, l_1, l_2)}{\partial l_i}(l_i(t))]^+, t = 1, 2 \quad (7)$$

其中， $[a]^+ = \max\{a, 0\}$ 。 $q_0(t)$ 和 $q_i(t)$ 为第 t 次迭代

运算中的步长，且在实际运算中，为提高算法的收敛速度，迭代步长的选择分为 2 个阶段，即在算法初始运行阶段，为使目标解快速收敛到最优解，机制选择相对较大的迭代步长，以此减少迭代的次数；在算法运行的后续阶段，机制选择相对较小的迭代步长，以此取得算法收敛过程的稳定性。同时，在满足应用数据 QoS 要求的状态下，为简化运算，迭代步长可选择一些常量。

在上述分布式数据速率匹配编码计算中，依据节点本地存储的数据流分组信息、邻节点信息等网络局部信息及式(6)、式(7)，编码节点 n_k 计算更新 l_i 和 r_k ($r_k = \min\{x_i^p, y_k\}$)， r_k 记录在路由响应信息 RREP 的速率信息域 r_i^p 中，通过 RREP 报文的携带传送，经路由发现构建的反向路径逐跳传向源节点 s (r_i^p 为 p 上的 f_i 数据编码匹配速率)，且在数据逐跳传输中， p 上各编码节点实时更新 r_i^p ，即 $r_i^p = \min_{n_k \in p}\{r_k\}$ 。当 s 从 RREP 报文中获得 r_i^p 信息后，针对数据流对应的多条路径， s 通过控制时间片 t 内数据票 $r_{ij}^f(t)$ 的发送量实现对编码数据流在各路径上的数据速率匹配控制。OMNR 机制具体过程描述如图 3 所示。

在上述 OMNR 机制过程描述存在 3 个关键点。1) 在数据速率编码匹配计算中，编码节点 i 依据式(6)计算节点本地数据流编码匹配速率 r_i ，同时进行比较操作，即若 $r_i < r_f(p_i)$ ($r_f(p_i)$ 为 RREQ 报文携带的对应数据流速率匹配值)，则 i 以 r_i 代替 $r_f(p_i)$ 值，否则，RREQ 报文中的 $r_f(p_i)$ 值不变，以此实现相应数据流编码匹配速率的计算。2) 目的节点依据 $\{p_l | (RTT(p_l) < T_0) \wedge (CN_{f_{p_l}}(p_l) = cn_0)\}$ 选择最优路径 p_l ，并通过 RREP 报文传送最优路径信息 p_l 和 $r_f(p_l)$ 。3) $r_f(p_l)$ 重计算的激活条件是数据流传送结束，对应数据流源节点发送速率更新 RU(rate update)信息，接收到 RU 的编码节点启动数据速率编码匹配计算过程，重新计算的 $r_f(p_l)$ 通过 ACK 报文携带传向其他编码数据流源节点。

在 OMNR 机制中，数据票为一种分组传送控制信息，可通过在数据分组结构中设置相应信息域表示，信息域内容可以用布尔型变量表示，以 0 或 1 值描述，即 1 表示分组获得链路传输控制权，0 表示分组未获得链路传输控制权，如此实现分组对数据票的携带传送，减小数据票通信开销。数据票

在分组的产生及编码组合过程中设置，即当新数据分组在源节点或编码节点产生时，分组的数据票设置为 1；而当 2 个线性独立的分组被编码时，2 个分组的数据票信息被编码节点设置为 0，同时，编码节点设置新编码分组的数据票信息为 1。数据票参量的作用主要体现在 2 个方面：避免在数据传输协议中设计复杂的分组调度机制，且数据票的传输状态在一定程度上反映了参与编码的数据流的优先级属性，这为实现对各数据流的区分操作提供了基础。数据票参量使机制实现了对各路径上不同数据流传送速率的有效控制，且数据票的动态调控方案使机制表现出较高的动态适应性。

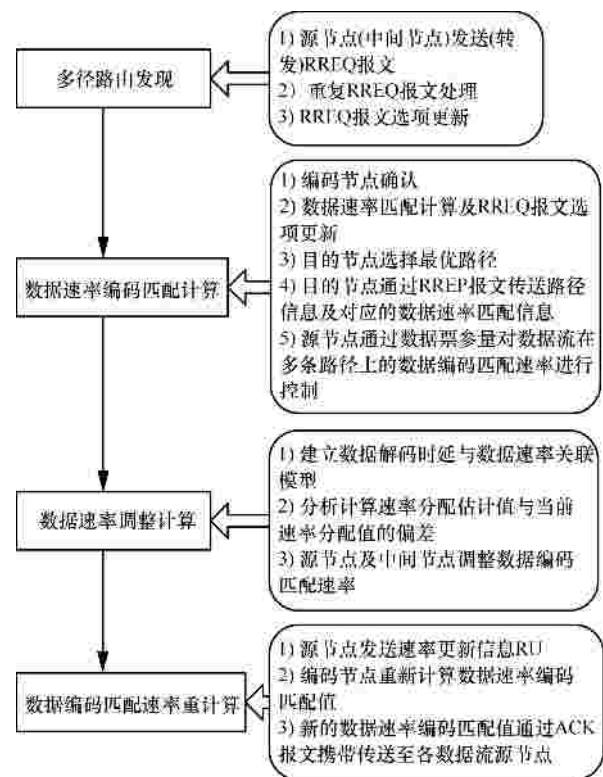


图 3 OMNR 机制具体过程描述

3.2.3 数据速率匹配调整过程

在 OMNR 机制中，如何实时检测机制的运行状态，以及依据机制运行状态对机制参量进行实时调整，是保证机制在链路状态时变的多跳无线网络中正常运行的一个关键点。对此，机制选择反映目的节点数据解码状态的数据解码时延为机制运行状态检测的重要参量，以此实现机制运行的动态调整，保证机制运行中各目的节点在设定的时间内成功地解码出原始数据，保证目的节点具有较高的解码概率。对此，基于 Gibbs 采样策略，OMNR 机制

在目的节点数据成功解码时延与数据编码匹配速率之间建立关联模型，通过对数据成功解码时延的统计分析调整编码中数据速率匹配值。针对某一数据批次 g_i (g_i 可表示为当前数据批次)，数据成功解码时延 t_i 定义为数据接收端 d (目的节点) 首次接收到 g_i 中分组的时间到 d 完成对 g_i 中数据分组解码的时间，即 d 成功接收并解码出 g_i 中数据分组的时间。当数据分组以网络编码数据速率匹配值 r_p (简记 r_i^p 为 r_p) 由路径 p 传送到 d 时， d 在检测时间周期 T_n (T_n 依据目的节点最大的解码时延量和被传送数据的 QoS 要求设定，满足 $T_n = \max_{1 \leq i \leq m'} \{t_i\}$ ， m' 为检测到的目的节点数) 内分析统计 t_i ，且针对 g_i 中的数据，设其对应各目的节点的解码时延 t_i 的集合为 D ，以路径 p 上的数据速率匹配值 r_p 为分析对象，结合概率统计理论， t_i 与 r_p 满足 $P(D|r) = \prod_{p_l \in P} p_l^K \cdot (1-p_l)^{(t_i/r_p)^s - K}$ (p_l 为第 l 条路径 p 上的数据分组分发率， P 为各数据流经的路径集)。应用 Gibbs 采样机制和全概率公式分析目的节点时延统计数据 D 、当前链路数据速率 r_p (此处链路为连接目的节点的链路) 和其他关联链路上数据速率匹配值 $\{\bar{r}_p\}$ ($\{\bar{r}_p\} = \bigcup_{p' \neq p} \{r_{p'}\}$)， r_p 和 $\{\bar{r}_p\}$ 即为目的节点其关联的路径 p (p') 上的数据流速率，如此存在数据速率匹配控制预期值：

$$P(r_p | D, \{\bar{r}_p\}) = \frac{P(D|\{r_p\}, \{\bar{r}_p\})P(r_p)}{\int_{r_p} P(D|\{r_p\}, \{\bar{r}_p\})P(r_p)dr_p} = \frac{P(D|r)}{\int_{r_p} P(D|r)dr_p}, \{r_p\} \cup \{\bar{r}_p\} = r \quad (8)$$

其中，参量 D 的取值范围为：当网络规模较小时， D 表示 T_n 内所有目的节点对应 t_i 的集合， r_p 表示关联各目的节点的路径 p 上的数据传送速率；当网络规模较大时， D 表示在 T_n 内随机选择的 w 个目的节点对应 t_i 的集合， r_p 表示 w 个目的节点关联的路径 p 上的数据传输速率，其中， w 依据网络规模和网络负载等进行启发式设置。基于式(8)描述的速率预测模型，目的节点可计算其关联路径 p 上的编码数据流预期速率匹配值 r'_p (r'_p 描述了 T_n 内数据流预期传送状态)。基于此，OMNR 机制中数据速率匹配调整算法描述如图 4 所示。

```

OMNR 机制中数据速率调整算法
While  $t < T_n$  // 在网络当前检测时间周期  $T_n$  内
    if  $|r_p - r'_p| < r_1$ 
         $r_p$  值保持不变；
    else if  $|r_p - r'_p| > r_1$  and  $|r_p - r'_p| > r_2$  //  $r_1$ 、 $r_2$  为阈值量，依据应用需求设定
        if  $r_p < r'_p$ 
             $r_p$  调整为  $r_p + b(r'_p - r_p)$ ； // 其中，若  $\sum_{i=1}^{m'} t_i > Th$  ( $Th$  为数据流的 QoS 最大时延要求)，则  $b$  满足  $0 < b < 1/2$ ，否则， $b$  满足  $1/2 < b < 1$ 
        else
             $r_p$  调整为  $r_p - b(r_p - r'_p)$ ；
        end
        源节点和中间节点更新  $r_p$ ； // 网络中间节点和源节点依据接收到的来自目的节点的当前 ACK 报文中的速率信息对相应数据流进行速率更新设定，即调整数据流对应的数据包的发送率
    else if  $|r_p - r'_p| > r_2$ 
        目的节点通过 ACK 报文向源节点发送速率匹配失效信息；
        依据式(6)和式(7)源节点计算新的速率匹配值  $r_p$ ，且在 RREQ 报文中数据速率域中存放；
        if  $r_p^{mid} < r_p$  //  $r_p^{mid}$  为网络中间节点在接收到速率匹配失效信息时重新计算的速率匹配值；
            中间节点以  $r_p^{mid}$  更新 RREQ 报文中的数据速率匹配值；
        end
        依据来自目的节点的 RREP 报文中的  $r_p$ ，源节点和中间节点更新编码数据速率匹配值；
    end
end
    
```

图 4 OMNR 机制中数据速率匹配调整算法

为使目的节点在应用要求的时间内接收到足够量的线性独立的编码分组，需要考虑两方面因素，即提高网络数据传送可靠性和减小数据传送时延，对此，OMNR 机制采用可控数据传送冗余量方案解决对应问题。即 s 依据在时间周期 T_n 内连续接收到的 ACK_g 或 $NACK_g$ 数量在同一时刻向网络连续发送 N_g 批次数据，以此避免 s 在等待某一批次数据的确认信息到达后再向网络发送下一批次数据的情况，减小数据传送时延，同时，针对每一数据批次，其以一定的冗余量 $K_0 - K$ 传输。且 OMNR 机制对冗余量关键参数 N_g 和 $K_0 - K$ 进行实时性周期控制，即在每一时间周期 T_n 的相继周期 T_{n+1} 开始时，依据反映网络当前通信质量因素对参数 N_g 和 $K_0 - K$ 按照相应规则进行调节。在 OMNR 机制中，为简化运算，机制依据 T_n 内的网络数据通信量 $RTT(P_i)$ 及源节点接收到的 $NACK_g$ 报文数量对冗

余参数进行反向比例动态设定，以此解决编码机制中数据传送的可靠性问题。

4 OMNR 机制性能评估

4.1 机制的有效性

4.1.1 机制的可靠性

在 OMNR 机制中，数据速率匹配计算过程采用了次梯度方法，次梯度方法是解决网络中线性规划问题的一种有效方法。结合文中梯度计算式(6)，若步长尺寸 $q_0(t)$ 满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0$ ，且 $\sum_{t=0}^{\infty} q(t) = \infty$ ，则通过式(6)迭代计算的速率值 $\{x_p(t)\}$ ($x_i^n(t)$ 简记为 $x(t)$) 且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - \hat{x}\| = 0$ (\hat{x} 为目标函数式(3)的有效解集合)，结合文献[18]，应用反证法证明上述等式，即若 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - \hat{x}\| > 0$ ，存在 $\|x(t) - \hat{x}\| > e$ ($\forall t > t', e > 0, t' \in \mathbb{N}$)，依据梯度方法属性有 $\|x(t+1) - \hat{x}\|^2 = \|x(t) - \hat{x}\|^2 - 2q(t)(x(t) - \hat{x}) + q(t)^2 C^2$ (C 为式(6)的梯度边界值)，基于条件 $\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0$ ，通过设置 t' 的值使得 $q(t)C^2 < e$ ，由此可得， $\|x(t+1) - \hat{x}\|^2 = \|x(t) - \hat{x}\|^2 - 2q(t) \cdot e + q(t)^2 C^2 < \|x(t) - \hat{x}\|^2 - q(t) \cdot e$ ，其中， $\forall t > t'$ ；对上述不等式迭代求和得 $0 < \|x(t) - \hat{x}\|^2 = \|x(t') - \hat{x}\|^2 - e \sum_{t'=t'}^{t-1} q(t')$ ，其中， $\forall t > t'$ ，当 $t \rightarrow +\infty$ ， $\sum_{t=0}^{+\infty} q(t) = +\infty$ ，这与初始条件 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_p(t) - \hat{x}\| > 0$ 矛盾，因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_p(t) - \hat{x}\| = 0$ 成立。在实际应用中，为简化运算，取 $q(t) = q$ (q 为常量)，次梯度算法收敛到关联 q 邻域中的次优解。上述分析确保了 OMNR 机制中数据速率匹配求解过程的收敛性。

4.1.2 编解码概率分析

对于编码概率，本文主要分析某一时间段内编码节点上分组的传送变化状态，设在时间间隔 T 内 (T 可设置为目的节点解码当前批次数据的时间 t_i)，编码节点上等待编码匹配的分组量为 l_1 ，已取得编码匹配的分组量为 m ，结合文献[19]对机会调度网络编码策略的分析描述，在时间 T 内，当分组编码阶段结束时，针对编码节点缓冲队列中未取到编码匹配的分组状态，其相关参量 l_1 对应的生成函数及均值为

$$M(z) = \sum_{l_2=0}^{\infty} P(l_2) \sum_{a_2=0}^{\infty} \frac{(lT)^{a_2}}{a_2!} e^{-lT} \sum_{a_1=0}^{a_2+l_2-1} \frac{(lT)^{a_1}}{a_1!} e^{-lT} z^{a_1} + \sum_{l_2=0}^{\infty} P(l_2) \sum_{a_2=0}^{\infty} \frac{(lT)^{a_2}}{a_2!} e^{-lT} \sum_{a_1=a_2+l_2}^{\infty} \frac{(lT)^{a_1}}{a_1!} e^{-lT} z^{a_2+l_2} \quad (9)$$

$$E[m] = \frac{l E[l_1](l^2 T^2 + 4lT + 2)}{2(m_1 - l)} - l^2 T^2 - lT \quad (10)$$

同理可得

$$E[l_1] = \frac{(2l^2 T^2 + 4lT)(m_1 - l)}{l^3 T^2 + 4l^2 T + m_1} \quad (11)$$

式(9)中， a_1 和 a_2 表示在编码过程中编码节点接收到的不同数据流的分组量，其服从泊松分布，即 $p_{a_1}(n) = p_{a_2}(n) = \frac{(lT)^n}{n!} e^{-lT}$ ，变量 l_2 表示编码节点在转发未取得编码匹配的分组过程中接收到的分组量，编码节点直接转发 l_1 量分组的时间服从 $1/m_1$ 的指数分布。基于此，机制中数据分组编码概率下界描述为 $E[m]/(E[m] + E[l_1])$ ，分组编码概率下界值充分表明在网络编码过程中，OMNR 机制提供的编码机会远大于随机网络编码策略提供的编码机会。

评价 OMNR 机制有效性的另一个重要参量是目的节点解码概率，节点解码概率主要取决于节点在检测时间 T 内的分组接收状态，即针对当前数据批次，节点接收到的线性独立分组量和分组到达节点的时间(满足 QoS 应用要求)，结合文献[11]对简单网络环境中数据接收端解码概率的描述，设 $P_{\{s_j, d_k\}, d_i}^{r_{s_j}}$ 为 d_i 成功接收(侦听)到由源节点 s_j 以速率 r_{s_j} 发送向 d_k 的数据的概率， $P_{d_k, s_j}^{r_{s_j}}$ ($P_{d_k, s_j}^{r_{ACK}}$) 为 s_j (d_k) 以速率 r_{s_j} (r_{ACK}) 向 d_k (s_j) 发送数据的数据分组分发率。在 OMNR 机制中，机制采用多径路由传送数据，因此，目的节点成功接收到各源节点数据的概率可描述为多路径数据分发率之和，进而目的节点 d_i 的解码概率 $P_{dec}(d_i)$ 描述为

$$P_{dec}(d_i) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n P_{\{s_j, d_k\}, d_i}^{r_{s_j}} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{f=1}^{\infty} \{(1 - P_{s_j, d_k}^{r_{s_j}} P_{d_k, s_j}^{r_{ACK}})^{j-1} P_{s_j, d_k}^{r_{s_j}} P_{d_k, s_j}^{r_{ACK}} \cdot \sum_{f=1}^j (1 - P_{s_j, d_i}^{r_{s_j}})^{f-1} P_{s_j, d_i}^{r_{s_j}}\} \quad (12)$$

由式(12)可知，数据分组分发率和数据传送速率等网络数据传送状态对节点解码概率具有较大的影响，而在 OMNR 机制中，数据速率匹配调整

策略使得数据流沿着不同路径以最优速率传送,保证了各数据流的充分编码,编码程度的提高保证了大量重要性相同的编码数据在网络多路径上的传送,为目的节点在较短时间快速接收到大量线性独立编码提供了条件,提高了解码概率,同时,可控数据冗余传送策略在较大程度上提高了数据传送的可靠性,这提高了机制的分组分发率,由此可知,OMNR 机制具有较高的解码概率。

4.1.3 机制的可行性分析

OMNR 机制的通信开销集中在编码节点识别和数据速率匹配 2 个方面,其是 OMNR 机制实现的重要基础。考虑到文中多径编码感知路由的建立过程应用到 AODV 路由协议的信息交互方式,而 AODV 协议具有链路对称性,以及 Hello 报文(维护网络一跳拓扑信息)周期性广播特点,这 2 个特点为编码节点识别中的信息交互设计提供了途径,特别是对 Hello 报文结构的修改,如在 Hello 报文保留字段增加邻节点数信息域、在报文结构末尾添加邻节点标识域及两跳邻节点信息域等,这使网络节点可相对容易获得一跳邻节点及两跳邻节点信息,实现了编码节点确定中的信息交互。同时,结合 AODV 协议中链路的对称性特点,通过 RREQ 报文和 RREP 报文携带传送数据速率匹配信息,OMNR 机制中数据速率匹配控制涉及到的信息交互过程相对容易实现。上述过程中信息的携带传送方式在较大程度上减少了附加控制信息的引入,较大幅度地减小了机制的通信开销,因此,从信息交互方面分析,OMNR 机制具有较高的可行性。

OMNR 机制的复杂性具有一定的可控性,具体表现在:机制涉及的主要运算(数据速率匹配计算及更新)均在节点本地进行,这得到目前快速发展的计算机软硬件技术的支持,且遵循网络中以计算开销换取通信开销的原则。另外,机制的运算主要为加减、比较等线性运算,这种轻度运算复杂性的增加相对于机制取得编码数据流分组充分编码的优势可被接受。若在运算中考虑到编码节点数 n 和数据流数量 m 两个主要因素,则 OMNR 机制运算复杂度可描述为 $o(n+m)$ 。同时,相对于其他速率分配控制机制,OMNR 机制因增加了数据速率动态调控过程而增加了节点的运算量,从而使得机制中数据速率运算算法的收敛速度在一定程度减小,但这取得了机制在状态时变的多跳无线网络环境中应用的有效性和可靠性,且相应算法的收敛速度可通过

迭代运算步长的动态调节得到一定程度的弥补。

4.2 OMNR 机制实验分析

为分析网络编码中数据传送速率控制机制对网络性能的影响,本文对 3 种涉及网络编码中数据传送速率控制的协议机制设计模拟实验,即 OMNR 机制、基于速率静态分配调整的 CNCR (constant-rate network coding routing) 机制^[10]、基于机会侦听的 COPE 协议模型^[5](文中采用启发式算法(GSPHA, Greedy set packing heuristic algorithm)实现 COPE 协议)。其中,CNCR 机制对多跳无线网络编码中数据速率静态分配问题进行了探讨,然未对速率分配的最优值进行必要的分析,且速率分配机制缺乏对多跳无线网络状态动态变化的适应性,OMNR 机制在一定程度上弥补了 CNCR 机制的不足;对于 COPE 协议,此处主要分析 COPE 协议中的数据传送转发机制,COPE 模型是无线网络流间网络编码协议的一个代表性协议,然其未对编码感知路由中编码数据流速率问题进行具体的分析。在此,本文对 3 种协议机制对应的网络数据传送性能进行实验分析。

4.2.1 实验设置

采用 NS-2 模拟器对上述 3 种协议机制进行实验,实验分析网络数据流数量、网络规模(节点数量)和节点传输范围等参量的变化对不同协议机制对应的网络数据传送性能的影响。实验中所有网络节点随机分布于 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ 的实验场景中,节点处于静止状态。实验中无线传播模型采用 Lucent 的 WaveLAN 模型和 Two-ray ground,链路带宽设为 2 Mbit/s 。为使实验具有一般性,随机选择数据流的源节点和目的节点,其他实验参数设置如表 1 所示,依据表 1 中的实验参数生成随机网络拓扑结构,如图 5 所示。实验测试 3 种网络编码协议机制对应的 4 种网络数据传送性能指标状态,且每一实验指标的结果值取 20 次实验数据的平均值。实验测试指标包括:1) 分组提交率(packet delivery ratio),描述在一次实验中,目的节点成功接收到源节点所发送分组数的百分量;2) 分组传输次数(number of packet transmission),描述所有网络节点分组传输量之和;3) 分组传送时延(packet transport delay),描述分组从源节点发送到目的节点成功接收到编码分组并解码出分组所需的时间;4) 网络负载均衡性(balance of load),描述不同网络采样时间内节点上数据分组的传输量。

表 1 实验参数设置

实验参数	参数值
MAC 协议	IEEE 802.11
模拟实验区域尺寸	1 000 m×1 000 m
节点数量	100~400
LAN 模式	Wave LAN
节点最大传输范围	200~500 m
数据流数量	10~40
实验次数	20
传播损耗系数	2

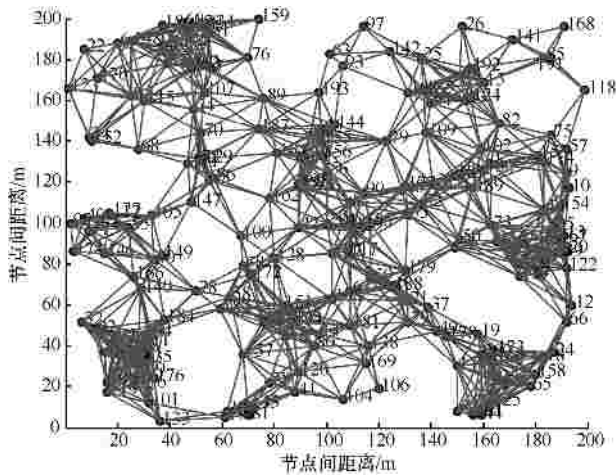
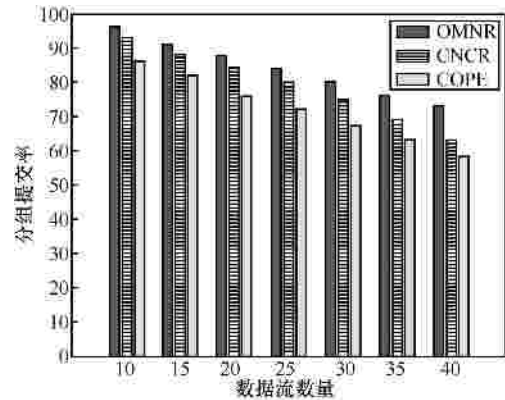


图 5 200 个节点构成的网络拓扑

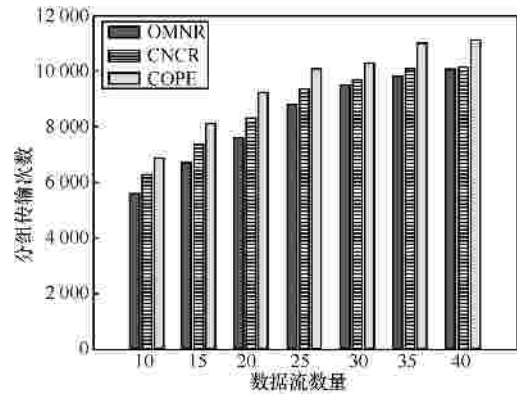
4.2.2 实验结果分析

实验首先针对 OMNR、CNCR 和 COPE 3 种协议机制在不同网络负载(数据流数量)下的网络数据传输性能状态进行实验分析。实验场景设置为 200 个节点(节点最大传输范围为 200 m)。图 6(a)表明,随着网络负载的增加,3 种机制对应的分组提交率逐渐减小,原因在于网络负载的增大(数据流数量增加)引起网络数据传输冲突加剧,数据传送拥塞概率增大。对 3 种协议机制进行比较,OMNR 和 CNCR 协议机制均比 COPE 协议具有更高的分组提交率,原因是两机制采用的多径路由协议提高了数据传送的可靠性,且 OMNR 通过在最优路径选择中设置反映网络通信状态的路径往返延时优选路径,这进一步提高了网络数据传输的可靠性。图 6(b)描述了 3 种协议机制对应的网络数据传输量随网络负载的增加而增大的状态,而相对于 CNCR 协议机制,均比 COPE 协议、OMNR 机制的分组传输量较小,原因在于 OMNR 机制通过数据速率匹配调整为编码数据流提供了最大的编码机会,编码机会的提高将在一

定程度上抑制数据传送量的增大。同时,图 6 表明,在网络数据流数量增大的过程中,各协议机制对应的分组传输量的变化趋于平缓,原因是流间网络编码机会在数据流数量增大的过程中将会增大,网络编码机会的增大减少了数据传输量及数据传输冲突的概率。



(a) 分组提交率

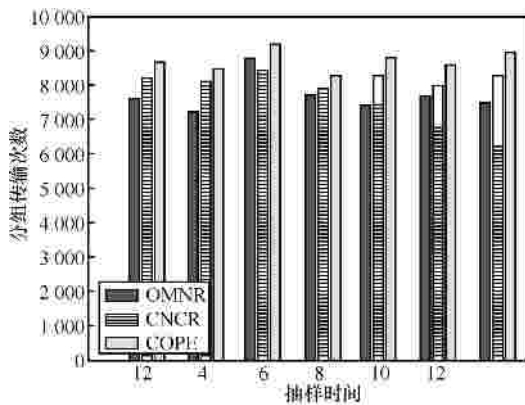


(b) 分组传输次数

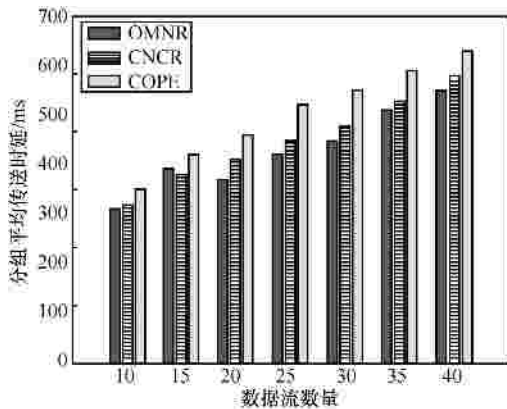
图 6 不同网络负载下各机制对应的数据传输性能变化

图 7(a)描述在节点数为 200、数据流数量为 20 的实验参数配置状态下,各编码机制对应的节点流量负载随网络抽样时间的变化而表现出的不同状态。每次实验的节点数 50,且节点的选择具有随机性,实验结果以 20 次实验结果均值表示。图 7 表明,在 OMNR 和 CNCR 机制下,网络负载变化幅度较小,负载呈现出较为均衡的状态,且 OMNR 机制对应的节点数据流量负载相对较小,原因是 OMNR 和 CNCR 机制在网络编码过程中对参与编码的数据流引入速率匹配操作,这使得沿不同路径传送的数据流分组均在最大程度上获得编码匹配分组,从而提高各数据流分组的网络编码机会,减小网络中数据分组的传输量,且 OMNR 机制在数据传送速率匹配控制中采用了数据速率动态调整

策略，这在更大程度上提高了网络的性能。图 7(b) 描述随着网络数据流数量的变化，3 种机制对应的网络数据传送时延表现出不同的状态。图 7 表明，OMNR 机制与 CNCR 机制对应的网络数据传送时延较为接近，但 OMNR 机制对应的数据传送时延相对较小，原因是 OMNR 机制与 CNCR 机制在网络编码过程中对网络数据在多径路由上的传送速率进行了优化控制，且 OMNR 机制在网络编码过程中考虑了网络数据传送的可靠性问题，如路径选择中数据传送回路时延的测量及数据传输冗余量的实时调整，如此可以减小网络数据重传量及数据传送的拥塞概率，进而减小了数据端到端的传送时延。



(a) 数据流数量为 20 时的网络负载分布

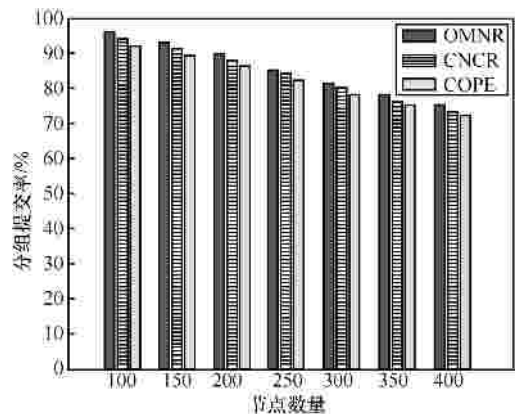


(b) 分组平均传送时延

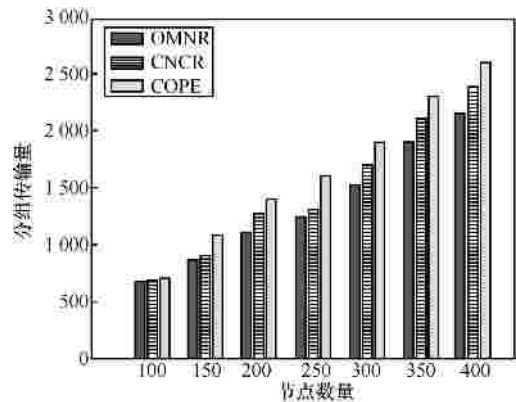
图 7 网络负载分布及对应的网络数据传送性能

图 8 描述在数据流数量为 10 和节点最大传输范围为 200 m 的实验场景中，3 种协议机制对应的分组提交率和分组传输量随网络规模变化的情况。图 8(a) 描述了在网络规模增大的过程中，3 种机制对应的分组提交率表现出相对较小的下降幅度，即网络规模变化对分组提交率的影响相对较小，且图 8 展示在网络规模由 100 个节点增加至 400 个节点的过程中

机制对应的分组提交率均维持在 70% 上。原因是在网络负载一定的情况下，当网络规模增大时，编码节点及数据传送路径数量随之增加，这在提高网络编码机会的同时提高了网络数据传送可靠性，如此过程均抑制分组丢失率的提高，减小了网络规模的增大对分组提交率产生的负面影响。图 8(b) 描述了在网络规模增大的过程中，3 种机制对应的分组传输量表现出相对较大的增加幅度。其中，COPE 协议机制对应的分组传输量的变化相对显著，原因在于网络规模的增大增加了分组转发节点数，分组转发传输次数增加，且网络编码操作在网络数据传送中所减少的分组传输量相对小于转发节点数增加所产生的分组传输量。同时，因 OMNR 机制较 CNCR、COPE 协议机制在更大程度上提高了网络编码机会，因此，其对数据传送性能的改善较为显著。



(a) 分组提交率



(b) 分组传输量

图 8 网络规模变化时的数据传送性能

5 结束语

OMNR 机制在编码感知多径路由协议的基础上分析数据速率的匹配编码及数据传送可靠性的保证问题，目的是使编码感知路径上的数据流分组

实现最大程度的编码，提高网络编码机会，均衡网络流量负载。机制通过数据速率的优化控制及路径上数据传输状态的检测实现网络编码方案的优化操作，在机制的实现过程中，基于对网络编码节点状态信息的实时检测及数据传输回路时延的测量，OMNR 机制通过改进 AODV 协议实现多条编码感知路径的建立；同时，基于对数据编码成本效益函数的优化分析，机制取得了编码感知路径上数据速率的匹配计算。此外，基于目的节点的数据解码信息、机制对数据速率的匹配过程进行动态调整，以此提高机制的动态适应性。为减小无线链路的不稳定性对网络数据传送性能的影响，OMNR 机制在编码感知路径选择及编码数据传送中引入数据传送回路时延检测和动态冗余数据传输策略，以此提高网络数据传送的可靠性。理论分析和实验结果表明，在多跳无线网络数据传送中，OMNR 机制取得了相对较好的网络数据传送性能。未来工作将对 OMNR 机制在异构网络融合的复杂大规模网络环境中的应用问题展开研究，并对机制在复杂动态网络环境中的适应性问题进行探讨，以及对机制应用于实际网络可能面临的问题进行分析。

参考文献：

- [1] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y, *et al.* Network information flow[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000, 46(4):1204-1216.
- [2] LUN D S, KOETTER R. Achieving minimum-cost multicast: a decentralized approach based on network coding[A]. Proc IEEE INFOCOM 2005[C]. Miami, FL, USA, 2005.1607-1617.
- [3] AGARWAL A, CHARIKAR M. On the advantage of network coding for improving network throughput[A]. 2004 IEEE Information Theory Workshop[C]. San Antonio, TX, USA, 2004. 247-249.
- [4] HO T, MEDARD M, SHI J, *et al.* On randomized network coding[A]. Proc of 41st Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing[C]. Monticello, IL, USA, 2003.1-10.
- [5] KATTI S, RAHUL H, HU W, *et al.* Xors in the air: practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2008, 16(3): 497-510.
- [6] SEFEROGLU H, MARKOPOULOU A. Delay-optimized network coding for video streaming over wireless networks[A]. Proc of IEEE Intl Conf on Communication(ICC)[C]. Cape Town, South Africa, 2010.1-5.
- [7] CHIECHAN S, HOSSAIN E, ISSARIYAKULT, *et al.* Opportunistic network coding and dynamic buffer allocation in a wireless butterfly network[A]. Proc of IEEE GLOBECOM 2009[C]. Honolulu, Hawaii, USA, 2009. 1-6.
- [8] MAHMINO A, LACAN J, FRABOUL C. Guaranteed packet delay with network coding[A]. Proc of IEEE 5th Ann Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops[C]. San Francisco, CA, USA, 2008. 1-6.
- [9] DIGGAVI S N, AL-DHAHIR N, STAMOULIS A, *et al.* Great expectations: the value of spatial diversity in wireless networks[J]. IEEE Journals & Magazines, 2004, 92(2):219-270.
- [10] LANEMAN J N. Network coding gain of cooperative diversity[A]. Proc of IEEE Military Communications Conference[C]. Monterey, CA, USA, 2004. 106-112.
- [11] KIM T S, VURAL S, BROUSTIS I, *et al.* A framework for joint network coding and transmission rate control in wireless networks[A]. Proc of IEEE INFOCOM 2010[C]. San Diego, CA, USA, 2010. 1-9.
- [12] ROH H T, LEE J W. Network coding-aware flow control in wireless ad-hoc networks[A]. Proc of IEEE Wireless Communications Networking Conference(WCNC 2009)[C]. Budapest, Hungary, 2009. 1-6.
- [13] YAN Y, ZHAO Z, ZHANG B, *et al.* Rate-adaptive coding-aware multiple path routing for wireless mesh networks[A]. Proc of IEEE GLOBECOM 2008[C]. Piscataway, NJ, USA, 2008. 1-5.
- [14] SHRADER B, BABIKYAN A, JONES N M, *et al.* Rate control for network-coded multipath relaying with time-varying connectivity[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(5): 1106-1117.
- [15] ZHANG J, ZHANG Q. Cooperative network coding-aware routing for multi-rate wireless networks[A]. Proc of IEEE INFOCOM 2009[C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009. 181-189.
- [16] REDDY V, SHAKKOTAI S, SPRINTSON A, *et al.* Multipath wireless network coding: a population game perspective[A]. Proc of IEEE INFOCOM 2010[C]. San Diego, CA, USA, 2010. 1-9.
- [17] LE J, LUI J C, CHIU D. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2010, 9(4):596-608.
- [18] ZOU J, XIONG H, LI C, *et al.* Prioritized flow optimization with multi-path and network coding based routing for scalable multirate multicasting[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2011, 21(3):259-273.
- [19] PAN P. Network Information Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

作者简介：



董赞强（1974-），男，河南灵宝人，博士，郑州航空工业管理学院讲师，主要研究方向为网络编码、智能信息处理。

沈苏彬（1963-），男，江苏南京人，博士，南京邮电大学研究员、博士生导师，主要研究方向为计算机网络、下一代电信网和网络安全。

毛燕琴（1981-），女，江西南昌人，博士，南京邮电大学讲师，主要研究方向为计算机网络和网络安全。