

基于网络编码的 数据通信技术研究

Research on the Techniques of Data Communication
Based on Network Coding

董赞强 著

0.2



电子科技大学出版社

基于网络编码的 数据通信技术研究

Research on the Techniques of Data Communication
Based on Network Coding

董赞强 著



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于网络编码的数据通信技术研究 / 董赞强著. — 成都: 电子科技大学出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-5647-3320-9

I. ①基… II. ①董… III. ①计算机网络—数据通信—通信技术—研究 IV. ①TP393.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 256618 号

基于网络编码的数据通信技术研究

董赞强 著

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号
电子信息产业大厦 邮编:610051)
策划编辑: 谭炜麟
责任编辑: 谭炜麟
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 河南承创印务有限公司
成品尺寸: 145mm×210mm 印张 8 字数 220 千字
版 次: 2015 年 12 月第一版
印 次: 2015 年 12 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-3320-9
定 价: 25.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话:028-83202463;本社邮购电话:028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

前 言

随着通信网络技术的快速发展和广泛应用,对网络数据通信质量的要求不断提高,如何在现有网络条件下通过更有效地利用网络资源,提高网络数据传输的性能,已成为当今网络通信研究的重要课题之一。网络编码作为一种融合编码与路由的技术,为实现这一目标提供了新的解决方案。网络编码允许网络中间结点对转发的数据分组进行编码组合操作,而不再限于网络数据传统处理模式中的存储转发操作,以此改善网络数据通信性能,如提高网络吞吐量和网络带宽资源的利用率、均衡网络流量负载,以及提高网络的健壮性等。因此,网络编码被认为是进入 21 世纪后信息处理和信息传输理论领域研究的重大突破,具有重要的理论价值和广泛的应用前景。

本书的工作是研究在应用网络编码的数据通信网络中,提高数据通信效率的机制和方法。书中主要研究网络编码在现有

网络协议结构中的位置、网络编码方案的优化和降低网络编码负面效应等重要问题及解决方案。书中的内容从三个方面研究基于网络编码的网络数据通信方案:网络编码与现有网络各层协议的结合、基于数据流传送模式控制的网络编码增益最大化,以及网络编码方案面临的数据传送时延控制与数据传送可靠性保证,以期使网络编码在与现有网络协议结合及最小化负面效应的条件下发挥最大的优势。本书的贡献体现在以下四个方面。

1. **网络编码跨层协议结构的研究:**研究网络编码与现有网络协议的结合是完善网络编码研究、促进网络编码实用化的关键问题。对此,通过详细分析网络编码与网络各协议层现有协议的结合,书中探讨了基于网络协议层参数联合调整的网络编码跨层协议结构模型;基于网络各协议层现有协议与网络编码关联的重要参数,模型构建描述网络编码增益的线性规划目标函数;通过对线性规划目标函数最优解的计算,取得对跨层网络编码协议参数的设置,从而取得基于网络编码的网络系统整体性能的最优化设计。理论分析表明模型具有显著的优势。

2. **基于数据速率匹配的网络编码优化机制的研究:**对现有网络编码方案的优化和改进是网络编码研究中的一个重要问题。网络编码在网络数据传送中获得充分应用的一个重要环节是提高网络编码机会。相对于编码感知路由协议通过路径建立

中编码结点的选择增大网络编码机会,书中从网络数据速率匹配的方面研究提高网络编码机会的途径,提出了数据速率匹配的网络编码优化机制。通过对关联编码数据速率的线性规划目标函数的求解和数据票参量的引入,在多条编码感知路径上实现数据速率匹配编码,提高了网络数据传送中的编码机会。同时,基于对反映目的结点数据解码状态的各数据批次解码时延的统计分析,通过信息反馈过程实现速率分配中的动态调整,提高模型的动态适应性。此外,数据速率匹配编码过程在提高网络编码机会及均衡网络流量负载的同时,在较大程度上降低了网络数据的传送拥塞。理论分析和仿真实验证明了模型的有效性。

3. 数据传送时延约束的动态网络编码机制的研究:由于数据传输速率的差异和网络链路状态的不稳定性,不同数据流分组到达网络各中间结点的时间不同。为了提高网络编码机会,部分分组需要等待编码匹配分组的到达;同时,为解码当前批次数据,目的结点需要等待接收到足够数量的编码数据分组,这都增大了网络数据传送时延。对此,书中探讨了一种基于时延约束的网络编码模型。模型通过对分组当前累积传送时延的实时检测,动态控制分组的编码机会,并依据分组所属数据流的服务优先级和分组的当前累积传送时延优先调度分组参与编码,保证高服务优先级数据的快速转发。为加快后继批次数据在网络

各中间结点的传送,避免大量冗余数据的传送,模型引入了确认信息逐跳反馈传输机制,以控制网络编码过程中数据传送时延。仿真实验验证了时延的控制结果。

4. 基于邻结点协作的网络编码数据转发机制的研究:网络中传送的编码分组具有相对独立性,如何保证编码分组沿数据通信质量较高的多条路径进行传送,是提高编码分组转发可靠性的关键问题。书中提出以分组转发概率为参数的转发结点集构建模型,结合对转发结点集中结点数据转发信用度的测量,模型实现对数据传送可靠性较高的多径路由的建立及选择,通过引入分组转发概率统计模型和多径路由机制提高了网络数据传送的可靠性。仿真实验对提出的机制进行了分析和验证。

本书在撰写过程中得到了南京邮电大学计算机学院沈苏彬研究员的指导,沈老师以渊博的学识和敏锐的思想对全书进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵意见。河南大学计算机与信息工程学院刘先省教授对本书的编写进行了详细地指导,刘老师以严谨的科研作风和高屋建瓴的学术意识对本书内容的撰写进行了详细地指导;郑州航空工业管理学院计算机科学与技术系李玲玲教授、路玲教授、陈建辉副教授和荆立夏副教授等对本书的编写提出了很多宝贵建议。电子科技大学出版社对本书的出版给予了大力支持。此外,本书涉及较多的专业知识和技术领域,在撰写的过程中参考和引用了大量国内外相关领域最新

研究成果和资料,许多朋友为此书的出版都付出了辛勤的劳动和卓越的贡献,在此一并表示衷心的感谢!

随着网络新技术的不断发展,网络编码技术的应用环境也在不断发展变化中,我们殷切希望得到各位读者的支持和建议,期待与大家共同探讨网络编码技术的研究和发展动向,以期对网络编码技术这一领域进行不断的完善。由于我们的水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

董赞强

2015 年 6 月

目 录 CONTENTS

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景	3
1.2 相关研究及其现状	8
1.3 主要研究内容	15
1.4 内容组织	19

第 2 章 基于网络编码的数据通信技术研究概述

2.1 网络编码的概念与定义	29
2.1.1 网络编码的理论基础	29
2.1.2 网络编码的基本原理	32
2.1.3 网络编码构造方法及分类	38
2.2 数据传送中的网络编码过程	42
2.3 网络编码应用于网络数据传送的研究	50

2.3.1	提高网络吞吐量	51
2.3.2	提高数据传送的可靠性	53
2.3.3	保证数据传送的安全性	58
2.3.4	降低编解码过程的负面效应	59
2.4	基于网络编码的数据传送技术研究趋势	60
2.5	典型的解决方案及分析	63
2.5.1	线性规划解决方案	64
2.5.2	集权图解决方案	66
2.6	提出的解决方案及其创新点	69
2.7	小 结	72

第3章 面向网络编码的网络协议结构

3.1	概 述	75
3.2	相关研究工作及基础	77
3.2.1	网络编码分层协议结构的研究	77
3.2.2	网络编码跨层协议结构的研究	81
3.3	网络编码在网络各协议层中的研究	82
3.3.1	网络编码与网络各层协议的结合	82
3.3.2	实用网络编码方案在网络协议层中的位置	85
3.4	一种基于网络协议参数联合调整的网络编码跨层协议结构	87

3.4.1 跨层协议设计的必要性	87
3.4.2 协议结构描述	89
3.4.3 协议性能分析	100
3.4.4 基于网络编码跨层协议结构设计存在的问题 ...	102
3.5 小 结	104

第4章 基于数据速率匹配的网络编码优化机制

4.1 相关研究工作及基础	108
4.2 网络模型	115
4.3 基于数据速率匹配的网络编码优化机制 OMNR ...	119
4.3.1 OMNR 机制应用的前提条件	119
4.3.2 OMNR 机制模型描述	122
4.4 OMNR 机制的性能分析	133
4.4.1 OMNR 机制的可靠性	133
4.4.2 OMNR 机制编解码概率分析	135
4.4.3 OMNR 机制实现的可行性分析	139
4.5 OMNR 机制的模拟实验	141
4.5.1 实验环境描述	141
4.5.2 实验结果分析	144
4.6 小 结	150

第5章 基于时延约束的网络编码模型

5.1	相关研究工作及基础	154
5.2	网络编码中数据传送时延约束模型描述	158
5.3	时延约束的动态网络编码模型 DNPDC	162
5.3.1	网络数据传送编码时延分析	162
5.3.2	DNPDC 模型数据传送过程描述	166
5.3.3	DNPDC 模型中编码数据窗口尺寸的动态调整 ...	169
5.4	DNPDC 模型性能分析及模拟实验	171
5.4.1	DNPDC 模型性能分析	171
5.4.2	实验分析	172
5.5	小 结	178

第6章 基于数据传送可靠性保证的网络编码机制

6.1	相关研究工作及基础	182
6.2	网络数据传送可靠性问题描述	186
6.2.1	网络模型描述	186
6.2.2	网络错误状态描述	188
6.2.3	接收端传送控制的数据传送可靠性保证策略 ...	189
6.3	一种基于邻结点协作的网络编码数据转发机制 CFMNC	190
6.3.1	机制描述	190

6.3.2	机制中数据传送批次描述	191
6.3.3	数据转发结点集与数据转发概率描述	192
6.3.4	CFMNC 机制中数据传送转发过程描述	196
6.4	实验分析	204
6.4.1	实验环境建立	204
6.4.2	实验结果及分析	205
6.5	小 结	210
 第 7 章 总结与展望		
7.1	工作总结	213
7.2	后续研究的展望	219
 参考文献		
		223

1.1 绪论

第1章 绪论

1.1 研究背景

随着通信网络技术的迅猛发展和网络应用程度的快速提高,各种形式的通信网络已广泛应用于人们的生产、工作和生活等各个方面,人们对网络应用的依赖程度越来越高。同时,随着通信网络宽带化的普及率不断提高,各种要求高带宽的网络应用业务越来越广泛,如在线视频聊天、网络视频点播、大型 3D 网络游戏、P2P 网络共享等高宽带网络应用,这要求宽带接入服务提供商必须不断地增加网络带宽建设成本,提高网络带宽。然而,运营商提供的带宽建设增长速度远小于用户对网络带宽需求的增长速度,如何提高现有的网络的数据传送效率,最大限度地利用现有网络资源成为缓解目前网络高带宽需求问题一个重要途径。另外,目前网络面临着另一个重要问题,即用户服务多样化和网络数据通信高质量的要求。对此,在现有网络条件下,如何更有效地利用网络资源并实现更高质量的数据通信,也成为网络通信领域重要的研究课题之一。

在传统网络的数据传送及分发过程中,网络中间结点只对接收的数据进行存储和转发操作,同时由于传送的数据不能被

叠加,因此,网络数据传送性能将会受到某个瓶颈链路容量的约束,这使得网络数据传送很难达到更大的吞吐量和更高的带宽资源利用率。而且,从信息论的角度思考,没有必要对网络结点的功能加以限制。考虑到区别于物品流(Commodity Flow)的网络信息流的特点,当信息存在冗余时,信息流可以被压缩编码,基此,Ahlsweide R. 等利用信息论证明了网络编码定理^[1],即在单源多播网络中,只有允许网络中的路由结点对其转发的数据进行某种重新编码操作,网络的吞吐量才能确保达到最大流(最小割定理所确定的网络容量上界)。这引起了人们对网络编码(Network Coding)理论及技术的极大关注,网络编码的引入彻底改变了通信网络中数据传送处理的方式,可作为对传统数据通信技术的一次革命性拓展,被认为是进入 21 世纪后信息处理和传输研究领域中最重要理论成果之一^[2~6]。

网络编码的提出是网络通信领域中的一项重要突破,目前,网络编码已发展成为一个重要的研究领域,对信息论、通信编码、计算机网络、无线通信网络等研究领域产生了深远的影响,成为现今最热门的研究领域之一。网络编码是一种融合编码和路由的信息交换技术,其原理表现为网络中结点对接收到的多个数据分组进行编码组合(在有限域中进行运算),编码后的数据再被中间结点以多点传送方式(多播)进行转发,目的结点可