

Liumeiti Fugai Wangluo Jiqi Guanjian Jishu Yanjiu

流媒体覆盖网络及其 关键技术研究

程德强 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

流媒体覆盖网络及其关键技术研究

程德强 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对实时视频流的网络传输,利用应用层组播技术,在介绍流媒体覆盖网络基本概念的基础上,分析流媒体覆盖网络中的节点管理、维护和应用层流量控制等关键技术,其中包括覆盖网络组播树的构建、组播岛的划分、组播服务节点的选取和实时视频序列的应用层采样。

本书可供理工科大学相关专业的教师和研究生阅读,也可供自然科学和工程技术领域中的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流媒体覆盖网络及其关键技术研究 / 程德强著. — 徐州:
中国矿业大学出版社, 2008. 10
ISBN 978 - 7 - 5646 - 0084 - 6

I. 流… II. 程… III. 多媒体技术—图像通信—通信网—
研究 IV. TP37 TN919. 85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 161989 号

- 书 名 流媒体覆盖网络及其关键技术研究
著 者 程德强
责任编辑 何 戈
责任校对 杜锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 5.375 字数 140 千字
版次印次 2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

实时视频流的网络传输需要应用合适的数据传输和调度控制机制,在保证实时视频流可靠传输的同时,要提高其网络传输效率,避免网络拥塞。

本书是作者多年来从事该方向研究工作的总结,通过分析数字视频的网络传输机制和流媒体覆盖网络,结合实时流媒体视频传输的特点,针对覆盖组播网络中的节点管理、节点维护以及应用层的流量控制等关键技术展开研究。

全书共分七章。第一章绪论,详细阐述了本书所叙述内容的研究背景和研究的课题;第二章流媒体覆盖组播网络研究,分析了流媒体覆盖组播网络的基本概念,并对覆盖组播网络进行性能评价;第三章稀疏模式下覆盖网络组播树研究,通过分析覆盖网络组播节点组织方法的特点,提出了一种三层共享组播树结构;第四章覆盖组播网络组播岛划分问题研究,提出了覆盖网络组播岛划分模型,完成树优先组播网络构建和节点的管理。第五章基于混合聚类算法的覆盖网络组播服务节点选择模型,利用隐式结构组播网络的优点,构建分层组播网络;第六章基于压缩域的实时视频序列应用层非线性采样,根据压缩域视频序列的特点,对视频序列进行时域压缩,完成视频流的网络传输流量控制;第七章结论。本书的相关研究工作得到中国矿业大学青年科研基金的资助。

本书撰写过程中,得到中国矿业大学信息与电气工程学院博士生导师钱建生教授多方面的指导和鼓励。感谢上海交通大学姜建国教授和同济大学刘富强教授在本书撰写过程中的有益指导和宝贵建议;中国矿业大学信息与电气工程学院于洪珍教授、任子晖

教授等为本书的撰写提供了许多有益的帮助。

由于受作者学识水平和可获得资料的限制,书中难免存在不足及错漏之处,敬请同行专家和读者批评指正。本人电子邮件地址为:cdqcumt@126.com。

程德强

2008年5月

目 录

| | |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题研究的背景及意义 | 1 |
| 1.2 流媒体视频技术现状 | 3 |
| 1.3 流媒体视频传输控制技术 | 9 |
| 1.4 应用层组播技术 | 12 |
| 1.5 主要工作和内容安排 | 13 |
| 第 2 章 流媒体覆盖组播网络研究 | 18 |
| 2.1 流媒体网络传输控制技术现状 | 18 |
| 2.2 流媒体覆盖组播网络结构研究 | 20 |
| 2.3 覆盖网络链路组播压力和伸长度性能评价 | 23 |
| 2.4 覆盖组播网络中的关键技术 | 29 |
| 2.5 本章小结 | 35 |
| 第 3 章 稀疏模式下覆盖网络组播树研究 | 36 |
| 3.1 组播树分析 | 36 |
| 3.2 基于共享组播树的覆盖网络构建 | 40 |
| 3.3 本章小结 | 46 |
| 第 4 章 覆盖组播网络组播岛划分问题研究 | 47 |
| 4.1 聚类分析算法 | 47 |
| 4.2 覆盖网络组播岛划分问题描述 | 67 |
| 4.3 覆盖网络组播岛划分模型 | 71 |

| | | |
|------------------------------------|------------------|-----|
| 4.4 | 仿真实验与结果分析 | 78 |
| 4.5 | 本章小结 | 83 |
| 第5章 基于混合聚类算法的覆盖网络组播服务节点选择模型 | | |
| | 选择模型 | 84 |
| 5.1 | 混合聚类算法 | 84 |
| 5.2 | 覆盖组播网络 MSNs 选择模型 | 100 |
| 5.3 | HKGM 选择模型 | 107 |
| 5.4 | 遗传控制策略 | 110 |
| 5.5 | 仿真实验与结果分析 | 111 |
| 5.6 | 本章小结 | 118 |
| 第6章 基于压缩域的实时视频序列应用层非线性采样 | | |
| | 实时视频序列应用非线性采样原理 | 119 |
| | 视频关键帧提取算法 | 122 |
| | 实时视频序列应用层非线性采样算法 | 133 |
| | 实验结果 | 136 |
| | 本章小结 | 138 |
| 第7章 结论 | | |
| | 主要研究内容总结 | 139 |
| | 创新点 | 141 |
| | 进一步的工作 | 142 |
| 附录 | | |
| 参考文献 | | |
| | | 157 |

第1章 绪 论

提高视频系统传输的效率和保证视频信号的可靠性传输是当前视频传输及其控制体系发展的一个重要方向,其中需要应用合适的数据传输和调度控制机制,在保证实时视频流可靠传输的同时,提高其网络传输效率,避免网络拥塞。

1.1 课题研究的背景及意义

传统的 Internet 可有效地完成文字、图形等离散媒体的传输,而对于声音、视频等连续多媒体数据的多点、大容量实时传送则表现出一些不足。针对多媒体数据的实时传输,为了满足连续媒体实时性和高吞吐量的要求,流式视频处理是非常有效的一种方法^[1,2]。视频图像经压缩编码被流化,并通过网络接口发送给网络,经过网络寻址和传输到达客户端。

流式视频传输系统框图如图 1-1 所示。模拟视频图像经过编码转换成视频流,经过发送模块在网络上传输,通过控制信息接收模块实时接收解码视频流,并在本地显示。



图 1-1 流式视频传输系统框图

为了在 IP 网上传输流式视频,目前采用的几种传输协议包

括^[1]:TCP、UDP 和 RTP。TCP 传输控制协议作为可靠的传输控制协议,可以用来可靠地传输流式视频。然而,TCP 传输控制协议用来传输流式视频有一些不利因素:

(1) TCP 传输控制协议基于 AIMD 的慢启动流量控制,可引起剧烈的视频抖动;

(2) 可靠的数据传输对流式视频传输是不必要的,因为流式视频在某种程度上可以容忍数据损失,并且 TCP 传输控制协议的错误重传机制会引起过大的视频传输延迟。

相对而言,UDP 是一种非可靠传输控制协议,对流式视频传输来说,是一种更为广泛使用的传输控制协议。UDP 的主要优点是放弃了 TCP 传输控制协议中的错误重传,允许数据丢失,其数据传输实时性高。视频数据的传输对于实时性的要求远高于可靠性,因此,在实时视频流传输时用 UDP 协议实现,而利用 TCP 协议实现对发送端和接收节点之间的控制信号提供有序、可靠的传输服务。但是,UDP 没有流量和拥塞控制机制,不能对网络状况作出反应,带有一定的带宽侵占性,因此,直接将 UDP 应用到网络视频流的传输,容易造成网络中 TCP 控制数据流带宽的“饿死”,产生网络传输中断。同时,在 IP 网络中流式视频传输服务质量既是不可管理的,也是不可预期的,缺乏对服务质量的支持,将会阻碍网络流式视频传输的发展。因此,需要发展合适的视频编码和网络传输控制技术,在保证视频图像质量的前提下,提高视频流传输的效率和可靠性,这也是当前流式视频传输体系发展的一个重要方向。

与此同时,根据煤炭工业科技“十一五”发展思路的要求,要推进矿井计算机网络管理,研究开发矿井数字信息与可视化技术,开发适应煤矿井下环境的高速、可靠、经济的宽带综合数字网络系统,建设大型矿井“数字矿山”示范工程^[3]。随着视频编码技术和网络技术的发展,实时数字视频监控系统在矿井安全监控中以其

可视化操作和形象直观等优点得到大量应用,也需要对流媒体的网络传输数据应用合适的传输和控制机制,保证实时视频流的可靠传输,并且提高其网络传输效率,避免网络拥塞,形成安全、高效的矿区监控网络平台。

1.2 流媒体视频技术现状

为了使视频流在 IP 网络上可靠、高效传输,研究工作主要可以分为两个大的方面^[4-6]:

(1) 发展更具灵活性的视频编码方案,进一步提高视频数据的压缩效率,使得信源编码输出的数据量尽可能地少,以适应网络最低传输带宽的情况。同时,必须有合适的错误控制技术来保证在用户端得到的视频失真最小。

(2) 发展网络传输控制技术,提高传输网络性能和数据传输效率,节省占用网络带宽,均衡网络负载,避免大容量实时视频流的传输引起网络阻塞。

1.2.1 数字视频压缩算法及比较^[5,7]

衡量一种数据压缩技术的优劣有三个重要的指标:

- (1) 压缩比要大;
- (2) 恢复效果要好,要尽可能地恢复原始数据。

前两个指标合在一起即要求:在保证一定观看质量的情况下尽量提高数据压缩比。

(3) 实现压缩的算法要简单,压缩、解压速度快,尽可能地做到实时压缩解压。这主要是出于工程上的考虑。

当前,用于网络视频流传输的主要有 MPEG1、MPEG2、MPEG4、H. 263 和 H. 264 编码算法。按照发展历程,数字视频压缩算法可划分为两代^[6]:第一代是传统的压缩编码格式,其理论基

础是 Shannon 的信息论,以经典的集合论为基础,用概率统计模型来描述信源,然后使用压缩技术去掉数据冗余信息;第二代是基于内容的编码方式,从信息接收者的角度和主观特性出发,考虑对象本身的含义、重要性以及引起的后果,去掉内容的冗余信息。下面主要针对 H. 263、MPEG4 和 H. 264 编码算法进行简要分析。

H. 263 是基于运动补偿的 DPCM 的混合编码,在运动搜索的基础上进行运动补偿,然后运用 DCT 变换和“之”字形扫描游程编码,从而得到输出码流。H. 263 在 H. 261 建议的基础上,将运动矢量的搜索增加为半像素点搜索,同时又增加了无限制运动矢量、基于语法的算术编码、高级预测技术和 PB 帧编码等四个高级选项,从而达到了进一步降低编码速率和提高编码质量的目的。

H. 263 采用运动视频编码中常见的编码方法,将编码过程分为帧内编码和帧间编码两个部分。在帧内用改进的 DCT 变换并量化,在帧间采用 1/2 像素运动矢量预测补偿技术,使运动补偿更加精确,使用改进的变长编码(VLC)对量化后的数据进行熵编码,得到最终的编码系数。H. 263 的编码速度快,其设计编码延时不超过 150 ms;同时,编码输出码率低,在 512 K 乃至 384 K 带宽下仍可得到相当满意的图像效果,十分适用于需要双向编解码并传输的场合和网络条件不是很好的场合。

MPEG4 是 ISO 为传输数码率低于 64 Kb/s 的实时图像设计的。与 JPEG、MPEG1、MPEG2 等其他标准所采用的基本压缩算法不同,该标准采用基于模型的编码、分形编码等方法,以获得极低码率的压缩效果。所涉及的应用范围覆盖了有线、无线、移动通信、Internet 以及数字存储回放等各个领域,它在信息描述中首次采用了“对象”(Object)概念。因此,是以内容为中心的描述方法,对信息元的描述更符合人的心理,不仅获得比现有标准更优越的压缩性能,也提供了各种新功能的应用。

MPEG4 是第一个使用户可在接收端对画面进行操作和交互

访问的编码标准。由于 MPEG4 基于对音视频对象(AVO)独立编码,必须同时传送编码对象的组成结构信息——“场景描述”。“场景描述”信息是独立传输的,解码时在解码端可改变选定 AVO 的“场景描述”参数,对图像和声音的有关内容进行编辑和操作。MPEG4 引入了合成与自然混合编码,以往的编码把人工合成信息视为自然信息的一个子集,如把计算机图形视为视频,MPEG4 把这类数据视为一种新的数据类型,支持对人工合成 AVO 数据与自然 AVO 数据的混合编码,这样的合成编码不仅可极大地提高编码效率(可获得 1 Kbps 的超低码率),而且可用于实现虚拟电视会议系统,丰富用户与场景的交互。

H. 264 是 ITU-T 的 VCEG(视频编码专家组)和 ISO/IEC 的 MPEG(活动图像编码专家组)的联合视频组(JVT:joint video team)开发的一个新的数字视频编码标准,它既是 ITU-T 的 H. 264,又是 ISO/IEC 的 MPEG4 的第 10 部分。H. 264 和其他压缩算法一样,采用 DPCM 加变换编码的混合编码模式。但它采用“回归基本”的简洁设计,不用众多的选项,就可获得比 H. 263 好得多的压缩性能;加强了对各种信道的适应能力,采用“网络友好”的结构和语法,有利于对误码和丢包的处理;应用目标范围较宽,以满足不同速率、不同解析度以及不同传输(存储)场合的需求。

H. 264 不但具有更高的编码效率,而且具有更好的网络适应性。还引入了面向 IP 包的编码机制,既有利于分组传输,又支持视频的流式传输,具有较强的抗误码特性。

相对于 MPEG4 和 H. 263 的性能,H. 264 各方面性能具有明显的优越性。但是,H. 264 性能的改进是以增加复杂性为代价而获得的,其代价是计算复杂度的大大增加,据估计,编码的计算复杂度大约相当于 H. 263 的 3 倍,解码复杂度大约相当于 H. 263 的 2 倍^[8-9]。

分层编码^[8]将多媒体视频数据压缩编码成多个码流。其中一个可以独立解码,称为基本层码流。其他码流必须与基本层码流一起被解码以获得好的视频质量和高的分辨率,这些码流称为增强层码流。视频服务器将每一层的压缩视频流发送到一个网络中,用户根据自己的网络带宽状况接收基本层和多个增强层数据,然后解码获得不同质量的视频。一般地,分层编码分为4类。

(1) 时间分层编码

以相同的空间分辨率、不同的帧率将原始视频信息压缩成两层——基本层和增强层。所谓不同的帧率就是对视频帧序列进行时间采样,以此来改变帧率。通常将I帧和P帧作为基本层,以低帧率进行编码。将B帧(双向预测帧)作为增强层,以较高的帧率进行编码。因为B帧本身不作为运动补偿的基准帧,B帧的丢弃对其他各帧的质量没有影响。

(2) 空间分层编码

以相同的帧率、不同的空间分辨率将原始视频信息压缩成两层——基本层和增强层。所谓不同的空间分辨率就是对视频序列进行空间采样,基本层以较低的空间分辨率进行编码,增强层在基本层的基础上形成高分辨率图像的空间预测。这样,空间采样随着层次的增加,分辨率逐渐提高,同时,码率也越来越高。解码器可以根据接收端的需要,在一定带宽速率的限制下接收不同层的视频信息,从而获得最好的视频接收效果。

(3) 信噪比分层编码

以相同的帧率和空间分辨率将原始视频信息压缩成两层——基本层和增强层,而且这两层的量化精度不同。基本层比特流经过可变长解码器(VLD)解码,再进行反量化,产生重建后的DCT系数,这是对基本层信息进行粗量化。增强层比特流进行可变长解码,然后进行反量化,产生DCT系数的增强层残差,这是对重建后的基本层与原始视频帧间的差值进行编码。

(4) 数据分割

数据分割一种将比特流简单分成一个重要部分和一个次要部分的方法,以便以不同的差错率进行信道的双层传送。不同于其他几种分级方法,数据分割方法可在系统级实施,因为它不改变低级的任何编码决定和算法选择,仅仅将已编好的数据分成两个部分。它在编码后可作为后处理步骤使用。

多描述编码^[10]把一个视频源生成多个码流(每一个码流称为对视频源的一个“描述”),这些码流同等重要,分别在独立的信道上传输。在接收端,根据被正确接收码流的不同,选择不同的解码恢复方案。只要有任一个描述被正确传输,解码器就可以恢复出一定质量的视频信号;如果有多个描述被正确接收,则提高视频信号的恢复质量。

1.2.2 实时流媒体视频传输方式^[11-13]

1.2.2.1 单播

在此种传输模式下,客户端与媒体服务器之间建立一个单独的数据通道,每个用户必须分别对媒体服务器发送单独的查询,而视频服务器向每个用户发送所申请的数据包拷贝。

以此种方式进行的数据流传输,其优点为:各个用户接收的视频彼此独立,服务器可以与每个用户进行交互操作,适合在广域网中使用。缺点为:当用户增多时,服务器的负担增加,可能导致服务器的过载,在网络中产生大量的冗余数据包,从而增大网络拥塞概率。

1.2.2.2 IP 组播

IP 组播将 IP 数据报“尽力传输”(Best-Effort)到一个构成组播群组的主机集合,群组的各个成员可以分布于各个独立的物理网络上。IP 组播群组中成员的关系是动态的,主机可以随时加入和退出群组,群组的成员关系决定了主机是否接收送给该群组

的组播数据报。

组播发送时,服务器将一组客户请求的流媒体数据发送到支持组播技术的路由器上,然后由路由器一次将数据包根据路由表复制到多个通道上,再向用户发送。此种机制下,流媒体服务器只需要发送一个数据包,所有发出请求的客户端都共享同一数据包,并且数据可以发送到任意地址的客户机,没有请求的客户机不会收到数据包。

从网络传输控制角度而言,对于现有“尽力传输”的IP网络,如果进行大流量、多点的内容传输,尤其是多路实时视频流的传输,IP组播是一种有效的传输机制^[14-19]。与点对点的单播数据传输协议相比,IP组播的带宽利用率高,数据传输效率高。

如图1-2所示,建立一个视频服务器和远端网络的通信,网络中有 N 个用户。对于组播传输,流媒体源通过发送端只需向网络

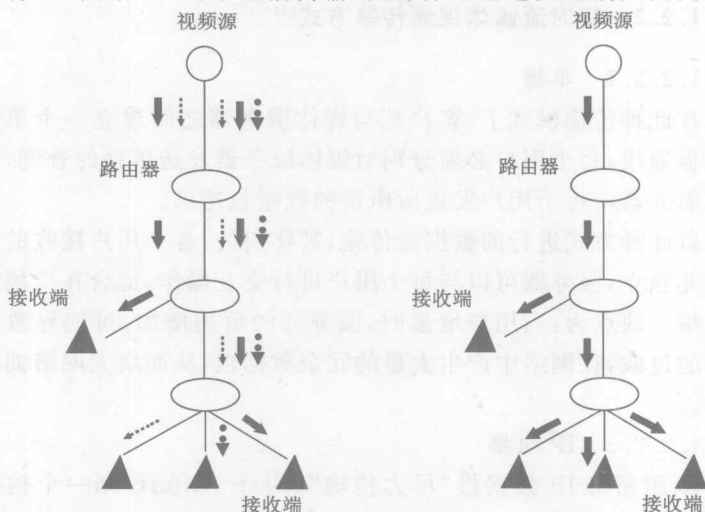


图 1-2 单播和 IP 组播比较

中传输一个视频信息流,通过路由器,给不同的接收端发送复制视频数据包,无论有多少接收端,都要保证不同的链路只传输一个视频信息流,减少不必要的视频复制,节省网络带宽。对于单播传输,流媒体源通过发送端向每一个发送请求的接收端复制一个视频流,并发送至接收端,因此,对于 N 个用户,需要在发送端把同一视频流复制 N 次后在网络中传输,发送服务器及其所在网络的容量是一个巨大的瓶颈。

1.3 流媒体视频传输控制技术^[1-2,8,12,20-22]

1.3.1 自适应码率控制

视频流传输过程中,主要利用 TCP 协议、UDP 协议和 RTP 协议。TCP 协议提供有序、可靠的传输服务,主要用来实现对发送端和接收节点之间控制信号的传输。由于视频数据的传输对于实时性的要求远高于可靠性,因此视频传输用 RTP 协议实现,而 RTP 用 UDP/IP 封装,利用 UDP 的多路技术和校验,完成数据的实时传输功能。

RTP 协议是由实时传输协议 RTP(Real-time Transport Protocol)和实时传输控制协议 RTCP(Real-time Transport Control Protocol)组成。RTP 本身并不能为按顺序传送的数据包提供可靠的传送机制,也不提供流量控制或拥塞控制等 QOS 保证,依靠 RTCP 提供这些服务,RTCP 和 RTP 一起提供流量控制和拥塞控制服务。在视频数据打包传输时,客户端和视频发送端周期性地传送 RTCP 控制包。RTCP 包中含有已发送的数据包的数量、丢失的数据包的数量等统计资料。因此,视频发送端可以利用这些信息,评估当前的网络状况,通过视频抽帧算法动态地改变视频数据帧的结构,按照 QOS 策略表重组视频帧(I 帧、B 帧、P

帧),达到改变视频传输帧率的目的。重组的视频帧经过 RTP 打包传输,改变传输的数据包分组的有效载荷和传输码率,适应网络状况的变化,使整个传输系统以有效的反馈和最小的开销达到最佳的 QOS 保证,使传输效率最佳化。其视频传输控制结构如图 1-3 所示。

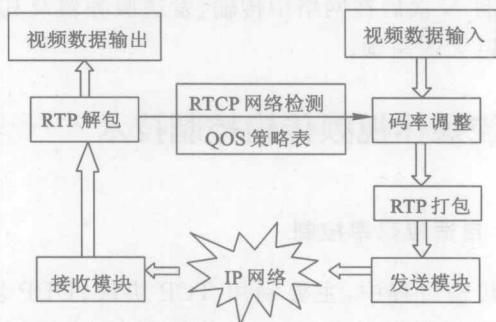


图 1-3 基于自适应编码的视频传输控制系统结构

自适应编码可以动态适应网络带宽的变化,但是它对服务器的要求很高。当用户增加时,服务器的负担大。

1.3.2 联播

Simulcast 技术是将码流切换和 IP Multicast 相结合而产生的一种视频传输控制方法。它是把同一段视频内容压缩编码成几个不同码率的视频流,同时用独立的组播通道把它们发送到 IP 网络上,用户根据网络带宽的变化,在这几个视频流之间切换。其中视频流的码率可以独立地动态调整,以适应网络 QOS 的动态变化,这样组播组中的用户可以接收到最接近他们带宽条件的视频流。Simulcast 组播的原理如图 1-4 所示。

联播方式中服务器的计算复杂度很低,但需要用到多个速率