基于网络编码的P2P TV拓扑优化

张志明[1,2] 周 晋[2] 陈 震[2,3] 李 军[2,3]
(清华大学自动化系 北京 100084)[1] (清华大学信息技术研究院 北京 100084)[2]
(清华大学信息科学与技术国家实验室 北京 100084)[3]

摘 要 网络编码使得网络中间节点可以对收到的数据包进行特定的编码后再转发出去,以实现组播的最大吞吐率。这一技术应用于P2P TV系统,可以改善系统的有效传输率和延时等性能。为了缩短系统中节点等待数据包的时长和降低计算开销,实际系统大都对网络编码进行了简化。这使得数据包的冗余率受到拓扑结构的影响,增大了系统开销。针对这一问题量化分析了拓扑引起冗余的原因,提出了即时控制拓扑优化的方法,以对拓扑进行即时控制,优化拓扑结构。实验结果表明,相比已有工作,即时控制在数据包冗余率和节点上行带宽容量利用率之间取得了更好的折衷,并获得了更高的有效传输率。

关键词 计算机网络,P2P TV,网络编码,拓扑优化
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Topology Optimization of Network Coding Based P2P TV

ZHANG Zhi-ming[1,2] ZHOU Jin[2] CHEN Zhen[2,3] LI Jun[2,3]
(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)[1]
(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)[2]
(Tsinghua National Lab for Information Science and Technology, Beijing 100084, China)[3]

Abstract With network coding(NC), intermediate nodes can form outgoing packets through coding incoming packets to achieve the theoretically maximum throughput of multicast. Network coding has been applied in P2P TV systems to improve the performance of delivery ratio, delay and so on. Generally, it is simplified in existing P2P TV systems to shorten the waiting time of nodes for incoming data packets and reduce computing overhead. This introduces the impact of the redundancy ratio of data packets on topology, and increases system overhead. The cause of redundancy brought by topology was quantitatively analyzed, and a topology optimization scheme named instant control was proposed to control and optimize topology spontaneously. Experimental results show that instant control reduces redundancy ratio of data packets caused by topology effectively. Compared with other similar work, it achieves better tradeoff between redundancy ratio of data packets and utility ratio of uplink bandwidth capacity, and further reaches higher delivery ratio.

Keywords Computer networks, P2P TV, Network coding, Topology optimization

1 引言

近年来,随着宽带接入的普及,流媒体应用日益流行,其中的一种重要应用就是流媒体直播。因为流媒体传输所需的带宽较高,同时服务器的带宽有限,所以系统规模受到限制。对等网(Peer-to-Peer,简称P2P)技术[1]可以利用网络中节点的上行带宽资源来弥补服务器带宽资源的不足,它被应用到流媒体直播系统,形成了P2P TV[2]。随后,一批商业P2P TV系统迅速得到了部署[3-6]。

现有的P2P TV仍存在不足。从用户角度来看,画面会出现马赛克、暂停播放等现象;同一直播内容在不同的用户之间会出现明显的不同步现象。背后的原因有用户的上行带宽得不到有效利用、数据的传输延迟过大等。研究人员针对现有P2P TV的不足做了大量研究工作[7-10]。

将网络编码(Network Coding,简称NC)应用于P2P TV是改善P2P TV各方面性能的一个重要研究方向。网络编码是指网络中的节点对收到的数据包进行编码等操作后再转发出去,而传统网络中的节点对收到的数据包只进行存储转发或丢弃操作。网络编码由R. Ahlswede等于2000年提出,目的是为了实现组播的理论最大吞吐率[11]。随着网络编码技术的发展,随机线性网络编码[12]已被研究人员应用于P2P TV系统,以缩短初始缓冲延时,改善播放质量,增强系统抵御节点动态性对系统的冲击能力等[13,14]。

为了缩短网络中间节点等待数据包的时长,降低中间节

到稿日期:2011-05-03 返修日期:2011-09-20 本文受NEC中国研究院资金资助。
张志明(1979—),男,博士生,主要研究方向为P2P流媒体,E-mail:zzm02@mails.tsinghua.edu.cn;周 晋(1977—),男,博士,主要研究方向为结构化P2P系统、P2P流媒体;陈 震(1976—),男,讲师,主要研究方向为高速网络、P2P系统、可信计算;李 军(1962—),男,研究员,主要研究方向为网络安全、网络体系结构。

点的计算开销，实际系统通常会对随机线性网络编码进行简化，这导致编码数据包的冗余率受到拓扑结构的影响，已有工作对此做了相关研究，以降低拓扑结构对数据包冗余率的影响[14-17]。反映播放质量的有效传输率主要受两个指标的影响，即数据包冗余率和节点上行带宽容量的利用率。现有控制数据包冗余率的工作主要从数据包冗余率角度考察了所提方案的有效性，没有对节点的上行带宽容量利用率进行检验，所以对其有效传输率还需要进一步探讨。

本文首先对可能引起数据包冗余的拓扑结构进行分类，然后通过实验详细分析各拓扑结构引起的冗余数据包所占的比例，最后提出了具体的解决方法，并通过实验检验所提方法的有效性。

本文第2节介绍相关工作；第3节对拓扑结构进行分类，并通过实验分析各拓扑结构对数据包冗余的不同影响程度；第4节提出即时控制拓扑优化方案；第5节对所提方案的有效性进行检验；最后对本文进行了总结。

2 相关工作介绍

2.1 随机线性网络编码

有限域[1]上的随机线性网络编码不需要知道整个网络的信息，适用于分布式系统，所以P2P TV一般都使用随机线性网络编码来改善系统的性能。

随机线性网络编码在应用于P2P TV时，需要将原始的等长视频数据包序列划分为一系列的段，每段包含 n 个原始数据包 $[X_1, X_2, \cdots, X_n]$，每个数据包 X_i 包含 k 个字节。当有限域的大小为 2^8 时，X_i 就可以看作 k 维的向量。当有限域的大小为 2^4 时，X_i 可以看作 $2*k$ 维的向量。之后，系统以段为单位进行编、解码，以数据包为单位进行传输。

当服务器需要为某个邻居 p 发送一个段中的数据包时，编码模块就在预先确定的有限域范围内，随机生成一组编码系数向量 $C_j^p=[\alpha_{1j}^p, \alpha_{2j}^p, \cdots, \alpha_{nj}^p]$，对该段中的数据包做如下的线性组合，生成一个编码数据包：

$$Y_j=\sum_{i=1}^{n}\alpha_{ij}^p * X_i$$

编码系数 C_j^p 作为包头与编码后的数据一起发送出去。这些编码系数会带来一定的带宽开销，开销的大小与有限域的大小和段中数据包的个数 n 成正比，与原始数据包的长度 k 成反比。

节点 p 收到 $m(m\leqslant n)$ 个数据包后，就可以为自己的邻居服务，发送该段内的数据包。当节点 p 给邻居 q 发送数据包时，假设节点 p 已经收到该段中 $d(d\geqslant m)$ 个编码数据包，则编码模块就随机生成一组编码系数 $C_l^q=[\beta_{1l}^q, \beta_{2l}^q, \cdots, \beta_{dl}^q]$，对该段中的数据包进行线性组合，生成一个新的编码数据包：

$$Z_l=\sum_{j=1}^{d}(\beta_{jl}^q * Y_j)=\sum_{j=1}^{d}(\beta_{jl}^q * \sum_{i=1}^{n}(\alpha_{ij}^p * X_i))$$
$$=\sum_{i=1}^{n}((\sum_{j=1}^{m}(\beta_{jl}^q * \alpha_{ij}^p)) * X_i)$$

式中，各个 X_i 前的系数为新的全局编码系数，这些系数可以通过新生成的 $1\times d$ 维系数向量 $[\beta_{1j}, \beta_{2j}, \cdots, \beta_{dj}]$ 和嵌在编码数据包 Y_j 中的 $d\times n$ 维系数矩阵相乘计算出来。

节点一旦收到了某个段中 n 个线性独立的编码数据包，就可以使用高斯-约当消去法进行解码，解出原始的 n 个数据包。原始数据组成数据矩阵 X，n 个线性独立编码数据包中的编码数据组成数据矩阵 B，嵌在编码数据包中的系数组成系数矩阵 A，这3者的关系是：

$$B=AX$$

使用高斯-约当消去法求出 A 的逆矩阵，就可以解出原始数据：

$$X=A^{-1}B$$

为了方便描述，在不引起歧义的前提下，下面使用数据包来代替编码数据包。

2.2 基于网络编码的P2P TV拓扑优化研究概述

P2P TV的核心是传输技术，包括拓扑构建和数据传输两部分。拓扑构建是指系统中的每个节点按照一定的规则与其它节点建立、维护或断开邻居关系，构建拓扑是为数据传输做准备。数据传输是指系统中的每个节点根据约定的机制将自己缓存的数据发给邻居节点。拓扑结构是数据传输的基础，数据传输反过来又促进拓扑结构的优化。拓扑结构的优劣直接影响数据传输的性能，进而影响整个系统的性能，所以本文对基于网络编码的P2P TV的拓扑结构进行优化。

基于网络编码的P2P TV的拓扑构建问题分为两类，一类是如何构建拓扑来有效利用节点的上行带宽、增强系统抵御节点动态性的能力、降低延时等，另一类是如何优化拓扑降低网络编码数据包的冗余率。

第一类拓扑问题是基于网络编码的P2P TV与未使用网络编码的P2P TV所共有的。P2P TV网络的构建和维护对系统性能有着直接的影响。拓扑的类型主要有树状拓扑和网状拓扑。实际系统中，节点的上、下线会对树状传输拓扑造成严重冲击。新节点上线时，根节点需要根据整棵组播树当前的情况将该节点加入到合适的位置。节点退出时，该节点的子节点需要马上找到一个新的节点作为自己的父节点。当系统规模比较大时，组播树的维护就变得非常困难。所以现在的商业系统中没有使用树状拓扑，而都是网状拓扑。

本文所要研究的内容是第二类拓扑问题，即拓扑结构所引起的编码数据包的冗余问题。随机线性网络编码的解码条件是接收节点需要收到段中原有数量的线性独立编码数据包。理论上，只要有限域足够大，接收节点在收到段中原有数量的编码数据包后，这些编码数据包线性独立的概率非常高[18,19]。例如，如果有限域的大小为 2^8，则线性独立的概率大于等于0.989。但这一理论的前提条件是，中间节点需要在完成解码之后才能进行编码为其它节点服务，即要求 $d=m=n$。实际系统中，为了节省中间节点的收包等待时长和计算开销，随机线性网络编码通常被设置为只要收到一定数量的编码数据包就可以进行再编码为其它节点服务，即 $m<n$。这一简化增加了数据包的冗余率，降低了接收节点的解码概率，所以为了能够解码，接收节点必须获得更多的数据包才能得到解码所需的线性独立数据包的数量。这一方面增加了编码数据包的传输延迟，另一方面浪费了系统中节点的上行带宽资源。文献[15]以文件下载系统为例进行研究，发现简化所引起的数据包冗余率的增加与网络拓扑结构有密切关系，具有小世

1 又称伽罗瓦(Galois)域，即包含有限多个元素的域，这里指的是从0到 2^n-1 这 2^n 个数所组成的数域，对域内的元素进行这个域上所定义的加、减、乘和求逆运算之后的值仍属于这个域。

界特征的网络所引起的数据包冗余率最低。文献[16]以 P2P TV 为研究背景做了类似工作。文献[17]也以 P2P TV 为研究背景进一步对拓扑结构进行了细化，列出了可能引起数据包冗余的具体拓扑结构。

本文针对网络编码数据传输过程中所特有的数据冗余问题，对引起数据包冗余的各种拓扑结构进行分类和量化分析，并以此为依据提出了一种拓扑优化方法，即在现有拓扑结构之上对邻居连接关系进行即时控制，降低拓扑结构所引起的数据包冗余率，并兼顾上行带宽容量的利用率，以获得更好的有效传输率性能。

3 拓扑结构与编码数据包冗余率的关系

3.1 相关定义

为了便于描述，在研究拓扑结构与编码数据包冗余率的关系之前，首先给出几个相关的定义。

1)编码密度(Coding Density)：编码时所使用的数据包数量 d 与段中原始数据包数量 n 的比值，即 d/n。

2)冗余率(Redundancy Ratio)：冗余数据速率与收到的数据速率之间的比值。其中冗余数据包括线性相关数据、过时数据和不能解码的数据。

3)上行带宽容量利用率(Utility Ratio of Uplink Bandwidth Capacity)：节点上传的速率与节点上行带宽容量的比率。

4)有效传输率(Delivery Ratio)：有效吞吐率(Goodput)与流媒体码率的比值。其中有效吞吐率定义为收到的可以播放的数据吞吐率。

5)带宽资源指数(Bandwidth Resource Index，简称 BRI)[20]：系统中所有用户的上行带宽容量与系统中所有用户所需上行带宽容量之间的比值：

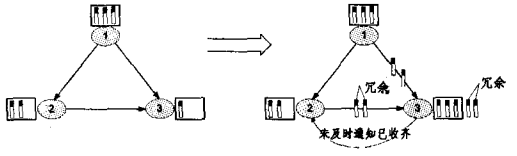
$$BRI=(\sum_{i=1}^{N}u_i)/(N*r_s)$$

式中，N 为系统中的节点数量，r_s 为流媒体码率，u_i 为第 i 个节点的上行带宽容量。

3.2 拓扑结构分类

在基于随机线性网络编码的 P2P TV 系统中，引起数据包冗余的拓扑结构可以分为以下几类。

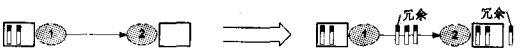
I. 接收节点未及时广播收齐通知。图 1 给出了 2 个节点同时向同一个节点发送数据包的例子。图 1(a)中节点 3 的一个段中缺 2 个数据包，图 1(b)中节点 1 和节点 2 同时向节点 3 推送数据包，节点 3 在收到节点 1 的 2 个数据包之后，未及时广播收齐通知，导致节点 2 也给节点 3 发送了 2 个数据包，引起数据包冗余。虽然这种情况与网络编码的简化没有直接关系，但为了统一描述，在此将其单独列出来作为一类。



(a)传输数据前的状态　　(b)传输数据后的状态

图 1　因接收节点未及时广播收齐通知而引起冗余的示意图

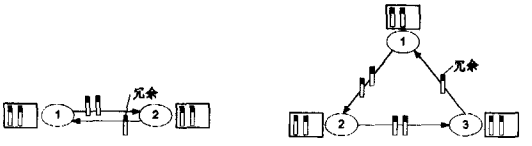
II. 发送节点发送了过量数据包。如图 2 所示，图 2(a)中节点 1 有 2 个数据包，节点 2 缺 3 个数据包，图 2(b)中节点 1 向节点 2 发送了 3 个数据包，其中必然有一个数据包是冗余的。这种情况是由周期性的数据调度引起的。因为数据传输算法在每个数据调度周期内对数据进行调度传输时，没有记录或无法获取过去的状态，不知道本节点已经向邻居传输了多少个数据包。



(a)传输数据前的状态　　(b)传输数据后的状态

图 2　因发送节点发送过量数据包而引起冗余的示意图

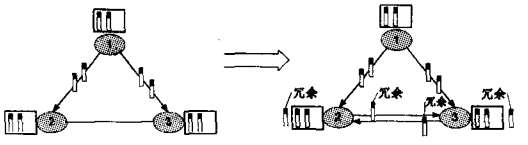
III. 节点之间形成了回路。如图 3 所示，图 3(a)中 2 个节点间形成了回路。节点 1 首先向节点 2 发送了 2 个数据包，节点 2 在收到这 2 个数据包之后节点 1 还缺一个数据包，所以节点 2 又对收到的数据包进行编码发给了节点 1。显然节点 2 发给节点 1 的数据包是冗余的。图 3(b)中 3 个节点间形成了回路。节点 1 发给节点 2 个数据包，节点 2 发给节点 32 个数据包，此时节点 1 还缺一个数据包，所以节点 3 将从节点 2 收到的两个编码数据包编码后发给节点 1，显然节点 3 所发送的数据包与节点 1 缓存中的数据包之间线性相关，是冗余数据包。



(a)2 个节点间形成了回路　　(b)3 个节点间形成了回路

图 3　因节点之间形成回路而引起冗余的示意图

IV. 邻居之间共享同一个父节点。如图 4 所示，图 4(a)中节点 2 和节点 3 分别从节点 1 收到了 2 个编码数据包，图 4(b)中节点 2 和节点 3 互相发送了一个编码数据包。因为节点 2 和节点 3 中的编码数据包都是来自于节点 1 中的 2 个编码数据包，所以节点 2 和节点 3 之间互相发送的数据包是冗余的。



(a)传输数据前的状态　　(b)传输数据后的状态

图 4　因邻居节点共享同一个父节点而引起冗余的示意图

V. 其它拓扑结构。如图 5 所示，节点 4 的 2 个父节点 2 和 3 分别从节点 1 收到了 2 个编码数据包，并同时进行再编码将数据包发给了节点 4。因为所有的编码数据包都来自节点 1 中的 2 个编码数据包，所以节点 4 收到的 3 个编码数据包中只有 2 个是线性独立的。实际系统中，节点 1、2、3 和 4 之间可能互为邻居，所以数据包冗余原因的分析会变得相当困难。当所涉及的节点数量达到 5 个及 5 个以上时，数据包冗余原因的分析会更复杂，所以将引起数据包冗余的这些拓扑结构归为一类，称为其它拓扑结构。

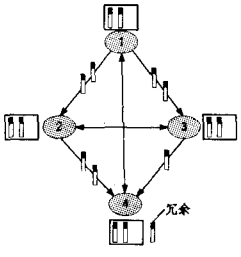


图 5　因两个父节点共享祖父节点而引起冗余的示意图

3.3 拓扑结构与编码数据包冗余率关系的实验分析

为了有针对性地对拓扑进行优化，本文首先研究各种拓扑结构引起的冗余数据包所占的比例。本文使用仿真器P2PStrmSim[21]，通过仿真实验对这一问题进行研究。因为P2PStrmSim不支持网络编码功能，所以本文首先对其进行扩展，使其成为一个基于随机线性网络编码的P2P TV仿真器。

数据的传输使用推式方法，即系统中的每个节点首先广播自己的缓存状态，然后每个节点根据邻居的缓存状态和本节点的缓存状态，将邻居所需要的数据包主动推送到邻居节点。

为了对各拓扑结构引起的数据包冗余率进行分析，实验过程中记录了所有编码数据包的关键信息。节点缓存中每个段的编码数据包都按照其到达的先后顺序进行了编号，节点在编新的编码数据包时，将该节点中所有参与编码的数据包编号保存在新的编码数据包中。当节点收到一个编码数据包后，首先通过渐进式解码判断该数据包是否冗余。如果收到的编码数据包冗余，则将该数据包中所记录的信息保存在一个文件中。如果收到的编码数据包线性独立(不冗余)，则将该编码数据包在段中的序号和编码数据包中所记录的信息保存在另一个文件中。待实验完成后，就可以通过分析这两个文件来解析各个冗余数据包所产生的原因。

实验中的参数配置如表1所列。用户之间的延时采用前人工作的测量结果[22]，他们可获得的带宽容量均匀分布在50kbps到1000kbps之间。服务器的上行带宽容量设定为2000kbps。为了获得2.0的带宽资源指数，所有节点的上行带宽容量都被设置为1000kbps。实验中每个节点的缓存长度为45s，其中已播放缓存设置为10s，待播放的缓存设置为30s。每个节点使用随机传输算法进行数据的推送。

表1 实验参数配置

参数	取值
节点数量	100(个)
视频码率	500(kbps)
每段中数据包个数	50(个)
数据包长度	1250(Bytes)
激进度	3(个)
缓存状态广播间隔	300(ms)
编码密度	0.1
带宽资源指数BRI	2.0
有限域大小	2^8

图6是各类拓扑类型所引起的数据包冗余率分析图。其中横轴对应前面的各种拓扑类型，纵轴是各种拓扑类型所引起的数据包冗余率。系统总的冗余率约为0.37。第一类拓扑所引起的数据包冗余率最大，为0.212，即节点未及时广播收齐通知导致的冗余率最高。其次是第二类拓扑引起的冗余率，即发送过量数据包所引起的数据包冗余率，为0.086。第三类和第4类拓扑结构所引起的冗余率则较低，分别为0.028和0.006。因为第五类拓扑包括了前面四类以外的所有拓扑类型，所以第五类拓扑结构所引起的数据包冗余率略高，为0.043。

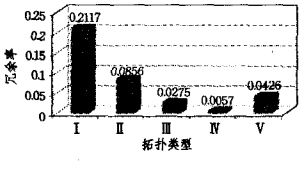


图6 各类拓扑结构所引起的数据包冗余率分析结果

4 基于网络编码的P2P TV拓扑结构优化方法

从随机线性网络编码的特点及前面的分析可以看出，编码数据包的冗余主要由以下几个原因引起：

1)节点只使用部分数据包进行编码并转发。

2)拓扑结构不合理。

3)编码数据包的平等性。因为每个编码数据包都包含了所有原始数据包的部分信息，所以编码数据包在解码之前都只记录了它所在的段号，而没有记录原始数据包的序号。节点在收到编码数据包之前不能判断其是否有用，只能将同一段中的所有编码数据包同等对待，即同一段中的编码数据包具有平等性。在收到编码数据包之后，节点通过高斯-约当消去法来判断其是否跟已经收到的段中数据包线性相关。如果线性无关，则对本节点是有用的；如果线性相关，则是无用的冗余数据包。

因为第1)个原因是实际系统中所需要的，第3)个原因是客观存在的，所以只能通过与拓扑结构相关的方法以及其它辅助方法来降低数据包冗余率。

增加每个段中原始数据包的数量是降低数据包冗余率的方法之一。从前面的分析可以看出，数据包的冗余率与段中数据包的个数成反比关系。第一类拓扑所引起的数据包数量与段中数据包的个数没有关系，当段中原始数据包数量增加时，同样数量的冗余数据包所占整个数据包数量的比率就会下降。因为第一类拓扑所引起的冗余数据包占主要部分，所以数据包的冗余率与段中数据包的个数成反比关系。文献[14]正是利用这一特点并配合其它辅助方法来降低数据包的冗余率。它将每个段中数据包数量设置为180个，每个数据包的长度为1kbytes，但此时编码系数的带宽开销占数据速率的比例为180/(1000+180)=13%，编码系数的开销过大。该文献进一步通过传输4字节伪随机种子的方法来降低编码系数开销，但这需要节点解出所有原始数据包之后才能进行编码传输，增加了节点的等待延时，也不利于节点充分利用上行带宽资源。

基于各拓扑类型所引起的数据包冗余率分析，本文采用与可控推[17](Network Coding with Controlled Push，简称NCCP)类似的方法，在拓扑构建和数据传输之间加一个优化控制层，在现有拓扑之上，对邻居的连接关系进行即时控制(Instant Control，简称IC)，从而影响数据传输，调节数据传输拓扑，降低拓扑引起的数据包冗余率。具体优化控制方法如下：

1)提升编码的激进度。激进度过低，会造成大量冗余数据包；激进度过高，会增加节点等待数据包的时长，降低系统的上行带宽容量利用率。与文献[17]一样，本文将激进度设为10个数据包。

2)取消固定的编码密度：对段中已收到的所有数据包进行编码，即新编码数据包是由段中已收到的所有编码数据包组合而成，随着收到的段中数据包数量的增加，编码密度也在逐渐增长，直到编码密度等于1。这一方面降低了节点的计算开销，另一方面兼顾了数据包的冗余率性能。

3)及时广播缓存信息：借鉴文献[14]的思想，节点在任一段收齐后，立即向邻居广播缓存状态，将某些段已收齐的状态及时通知邻居节点，减少邻居发送的冗余数据包数量。

4)限制一次发送的数据包数量：

a)假定多节点同时向同一邻居的一个段发送数据，各节点发送的数据包数量上限取这一邻居段中所缺数据包的平均数。如果这个平均数小于1，则将这一平均数作为概率，以这一概率发送一个数据包。

b)设定上限，限制向同一邻居发送段中数据包的数量。设定这一上限为激进度的一半，使得邻居节点的段中数据包来源尽量分散。

5)记录各个数据包来源：节点记录每个段从各邻居分别收到多少个数据包，当该节点为邻居服务时，计划发送的数据包数量中扣除从该邻居收到的数据包数量，以避免两个邻居节点间形成回路。例如，如果节点A从邻居B收到一个段中的1个数据包，当节点A收到该段中2个数据包后开始为邻居B服务时，则节点A最多只能向邻居B发送(2−1=1)个数据包。

5 拓扑结构优化方法的实验与结果分析

图7是本文的即时控制方法与可控推方法的冗余率比较图。图中的横轴是带宽资源指数，纵轴是冗余率。从图中可以看到，即时控制方法可以使得冗余率保持在0.02到0.06之间，但与可控推方法相比有一定的差距。虽然文献[17]声称可控推冗余控制方法在理论上可以使得冗余率为零，但实际上由于网络延时的存在，冗余控制方法总会有一定的滞后，这会导致出现一些冗余数据包。从图中可以看到，可控推方法可以使得冗余率保持在0.01到0.02之间。总体上来看，当带宽资源指数降低时，冗余率也跟着下降，这是因为节点的上行带宽资源指数较低时，节点在单位时间内所发送的数据包数量减少，第一种拓扑类型引起数据包冗余的概率也跟着下降，这与文献[23]中的结论一致。

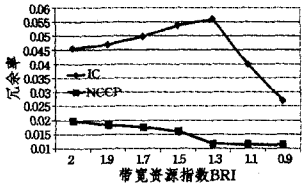


图7 即时控制方法与可控推方法的冗余率比较图

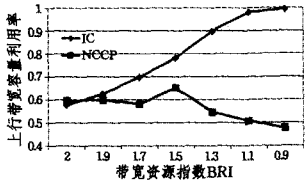


图8 即时控制方法与可控推方法的上行带宽容量利用率比较图

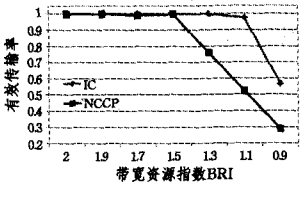


图9 即时控制方法与可控推方法的有效传输率比较图

图8和图9是相应的上行带宽容量利用率和有效传输率对比图。从图8中可以看到，随着带宽资源的减少，即时控制方法的上行带宽容量利用率逐渐增加并达到了1。这是由于带宽资源逐渐减少，节点必须利用更大比例的上行带宽资源才能获得满意的数据速率。相应地，可控推方法的上行带宽容量利用率稍有增加后又略有下降，这是因为可控推的冗余控制方法过于保守，导致系统中的节点不能充分利用上行带宽容量。从图9中可以看到，由于即时控制方法可以充分利用系统中节点的上行带宽容量，因此当系统中的带宽资源较低时，相比可控推的拓扑优化方法，即时控制方法可以获得更好的有效传输率性能。

结束语 本文对基于网络编码的P2P TV中拓扑结构引起的编码数据包的冗余问题进行了研究，并兼顾了节点的上行带宽容量利用率。本文首先对拓扑类型进行了分类，其次通过实验量化分析了各拓扑类型所引起的数据包冗余率，最后提出了拓扑优化控制方法，即在拓扑构建和数据传输之间增加一个即时控制层，对节点之间的连接关系进行即时控制，以优化拓扑。实验结果表明，相比已有工作，本文提出的即时控制方法在冗余率和上行带宽容量利用率之间取得了较好的折衷，获得了更好的有效传输率性能。

参 考 文 献

[1] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, Decentralized Object Location, and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems [C]// Proc of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms(Middleware). Heidelberg, Germany: November 2001: 329-350

[2] Zhang X, Liu J, Li B, et al. CoolStreaming/DONet: A Data-driven Overlay Network for Peer-to-Peer Live Media Streaming [C]// Proc of the IEEE INFOCOM. Miami, FL, USA: IEEE Press, 2005: 2102-2111

[3] PPLive [OL]. http://www.pplive.com/en/

[4] UUSee [OL]. http://www.uusee.com/

[5] QQLive [OL]. http://tv.qq.com/

[6] PPStream [OL]. http://www.ppstream.com/

[7] Ren D, Li Y-T H, Chan S-H G. On Reducing Mesh Delay for Peer-to-Peer Live Streaming [C]// Proc of the IEEE INFOCOM. Phoenix, AZ, USA, 2008: 1058-1066

[8] Liu Y. On the Minimum Delay Peer-to-Peer Video Streaming: how realtime can it be? [C]// Proc of the ACM Multimedia. Augsburg, Germany, 2007: 127-136

[9] Bonaldy T, Massoulié L, Mathieuy F, et al. Epidemic Live Streaming: Optimal Performance Trade-Offs [C]// Proc of the ACM SIGMETRICS. Annapolis, MD, USA, 2008: 325-336

[10] Li B, Xie S, Qu Y, et al. Inside the New Coolstreaming: Principles, Measurements and Performance Implications [C]// Proc of the IEEE INFOCOM. Phoenix, AZ, USA, 2008: 1031-1039

[11] Ahlswede R, Cai N, Li S-Y R, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216

[12] Ho T, Koetter R, M'edard M, et al. The Benefits of Coding over Routing in a Randomized Setting [C]// Proc of the IEEE International Symposium on Information Theory. Yokohama, Japan, 2003: 442

[13] Wang M, Li B. Lava: A Reality Check of Network Coding in Peer-to-Peer Live Streaming [C]// Proc of the IEEE INFOCOM. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Press, 2007: 1082-1090

[14] Wang M, Li B. R^2: Random Push with Random Network Coding in Live Peer-to-Peer Streaming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Advances in Peer-to-Peer Streaming Systems, 2007, 25(9): 1655-1666

(下转第70页)

算法、LANDMARC算法和VIRE算法的*ME*平均估计误差做对比分析。在这两个区域的每次实验中随机选择10个位置，对每一个位置分别用VSS算法、LANDMARC算法和VIRE算法进行50次定位测量。图6和图7是实验结果的汇总分析。

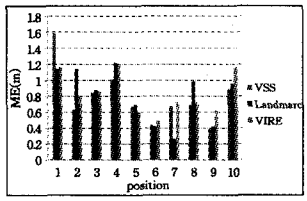


图6 中心区域定位误差对比

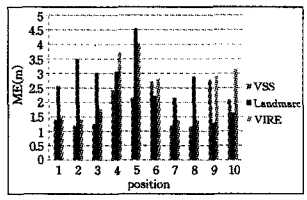


图7 外围区域定位误差对比

从图6、图7可以看到，中心区域LANDMARC算法的定位误差在0.26～1.14m之间，VIRE算法的定位误差在0.49～1.19m之间，而VSS算法的定位误差在0.39～1.58m之间。在外围区域，LANDMARC算法的定位误差在1.2～4.5m之间，VIRE算法的定位误差在1.3～4.0m之间，而VSS算法的定位误差在1.1～2.8m之间。使用LANDMARC算法对中心区域定位的平均误差约为0.9m，VIRE算法的平均误差约为0.83m，VSS算法的平均误差约为0.78m。使用LANDMARC算法对外围区域定位的平均误差约为2.69m，VIRE算法的平均误差约为2.4m，VSS算法的平均误差约为1.84m。相比较而言，在中心区域VSS算法比VIRE算法的定位精度平均提高了约0.05m，比LANDMARC算法平均提高了约0.12m，在外围区域VSS算法比VIRE算法的定位精度平均提高了约0.56m，比LANDMARC算法平均提高了约0.85m。

结束语 本文通过对现有室内定位方法的研究与分析，探索了一种基于虚拟信号强度的RFID室内定位方法，它可以较好地解决通过部署大量RFID设备来提高定位精度而引起的信号干扰问题，并可以降低系统成本，提高定位精度。未来的工作将集中在结合多种位置感知信息，进一步提高定位精度。

参考文献

[1] Atzori L, Iera A, Morabito G. The Internet of Things: A survey [J]. Computer Networks, 2010, 54(15): 2787-2805

[2] Fuchs C, Aschenbruck N, Martini P, et al. Indoor tracking for mission critical scenarios: A survey [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2011, 7(1): 1-15

[3] McNeff J G. The global positioning system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 645-652

[4] Sun G, Chen J, Guo W, et al. Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 12-23

[5] Fretzagias C, Papadopouli M. Cooperative Location-sensing for Wireless Networks[C]//Proceedings of the Second IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications(PerCom'04). March 2004: 121-131

[6] Smith A, Balakrishnan H, Goraczko M, et al. Tracking moving devices with the cricket location system[C]//Proceeding ACM MobiSYS'04. 2004: 190-202

[7] Figel W G, Shepherd N H, Trammel W F. Vehicle location by a signal attenuation method[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1969, 11(18): 105-109

[8] Paul A S, Wan E A. Wi-Fi based indoor localization and tracking using sigma-point Kalman filtering methods[J]. IEEE, 2008: 645-659

[9] Ni L M, Yunhao L, Yiu Cho L, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID[C]//Pervasive Computing and Communications(PerCom 2003). 2003: 409-415

[10] Hightower J, Want R, Borriello G. SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength[R]. 2000-02-02. Seattle, WA: University of Washington, Feb. 2000

[11] Hightower J, Vakili C, Borriello G, et al. Design and Calibration of the SpotON Ad-Hoc Location Sensing System[R]. 00-02-02. Seattle: University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, August 2001

[12] Yiyang Z, Yunhao L, Ni L M. VIRE: Active RFID-based Localization Using Virtual Reference Elimination[C]//the 2007 International Conference on Parallel Processing(ICPC 2007). 2007: 56-56

[13] Luo X, O'Brien W J, Julien C L. Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites[C]//Advanced Engineering Informatics. 2010

[14] Zhao J, Zhang Y, Ye M. Research on the received signal strength indication location algorithm for RFID system[J]. IEEE, 2006

[15] Want R, et al. The active badge location system [J]. ACM Transactions on Information Systems(TOIS), 1992, 10(1): 91-102

(上接第40页)

[15] Small T, Li B, Liang B. Topology Affects the Efficiency of Network Coding in Peer-to-Peer Networks [C]//Proc of the International Conference on Communications(ICC). Beijing, China, 2008: 1807-1812

[16] 陈伟涛. 基于网络编码的P2P流媒体性能优化研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2008

[17] 李亚龙. 基于网络编码的P2P直播数据传输策略研究与实现[D]. 成都：电子科技大学，2009

[18] Ho T, M'edard M, Koetter R, et al. A Random Linear Network Coding Approach to Multicast [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2006, 52(10): 4413-4430

[19] Sanders P, Egner S, Tolhuizen L. Polynomial Time Algorithms for Network Information Flow [C]//Proc of the 15th ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures(SPAA). San Diego, California, USA, June 2003: 286-294

[20] Chu Y-h, Ganjam A, Ng T S E, et al. Early Experience with an Internet Broadcast System Based on Overlay Multicast [C]//Proc of the USENIX Annual Technical Conference. Boston, Massachusetts, USA, July 2004

[21] Zhang M, Zhang Y X Q, Sun L, et al. Optimizing the Throughput of Data-Driven Peer-to-Peer Streaming [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(1): 97-110

[22] Wong B, Slivkins A, Sirer E G. Meridian: A Lightweight Network Location Service without Virtual Coordinates [C]//Proc of the ACM SIGCOMM. Philadelphia, PA, USA: ACM Press, 2005: 85-96

[23] Chen X, Ren N, Zhang X, et al. SonicStream: a Network Coding Based Live P2P Media Streaming System with Rich User Experiences [J]. Journal of Communication and Networks, 2008, 10(4): 430-436