



北京大学

硕士研究生学位论文

题目： 面向无线网络的实时视频传输

算法优化和系统实现

姓 名： 耿玉峰

学 号： 1301214299

院 系： 信息科学技术学院

专 业： 计算机应用技术

研究方向： 网络视频传输

导师姓名： 郭宗明 研究员

二〇一六年四月

Rate Adaptation And UEP Of Real-Time Video Streaming Over Wireless Networks

Dissertation Submitted to
Peking University

**In partial fulfillment of the requirements for the degree of
Master**

By
**Yufeng Geng, Master Candidate
(Science)**

Dissertation Supervisor: **Professor Zongming Guo**

Department of Applied Computer Science
College of Electronic Engineering and Computer Science
Peking University
April, 2016, Beijing

版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

摘要

随着移动智能设备的发展和 3G、4G、WiFi 等无线网络的普及，实时视频通话的使用越来越广泛，通话质量大幅度提高。另一方面，实时视频对网络质量尤其是网络延迟的高度敏感和无线网络参差不齐的网络质量之间的矛盾极大阻碍了实时视频服务质量的提升。本次课题主要针对面向无线网络的实时视频通话存在的问题，进行相关研究。首先，我们关注在有限并且不断波动的网络带宽下，如何及时调整视频码率从而在避免拥塞的前提下最有效地利用网络带宽。与传统拥塞控制算法（TCP、TFRC 等协议）不同的是，应用于实时视频的拥塞控制算法对网络延迟有更高的要求，同时需要考虑视频数据本身的特点。为此，我们提出了一个基于排队延迟和控制论优化的拥塞控制算法，在保证网络延迟低于目标值的前提下对带宽进行更加高效稳定的利用。其次，针对无线网络较高丢包率，而传统差错保护算法往往引入较大额外延迟的问题，我们采用了基于扩展窗口的 FEC 冗余保护方案，并在此基础上结合实时视频数据包重要性不同的特点，对冗余数据的分配进行了优化。利用我们的优化框架，可以在不引入额外延迟的前提下，大大提高 FEC 冗余保护的效果。最后，在上述研究的基础上，我们对一个开源 VOIP 软件 Linphone 进行了改进。实现了新的拥塞控制算法和 FEC 冗余保护模块，并针对大屏电视盒子进行了界面优化。与传统实时视频应用相比，我们的软件能更好地适应无线网络特性，提供更高质量的实时视频通话效果。

关键词：实时视频通话，无线网络，拥塞控制，差错保护，实时视频应用

Rate Adaptation And UEP Of Real-Time Video Streaming Over Wireless Networks

Yufeng Geng (Science)

Directed by Professor Zongming Guo

ABSTRACT

With the popularity of camera-ready mobile devices and 3G/4G/WiFi wireless infrastructure, interactive video applications with wireless Internet access links are growing exponentially. However, real-time video streaming over wireless networks still faces many challenges such as varying latency, bandwidth fluctuation, and wireless physical packet losses. In this research, we focus on the quality of service (QoS) improvement of real-time video streaming over wireless networks. Firstly, we propose a delay-constraint rate control algorithm for real-time video streaming over wireless networks. We first introduce a fluid-queueing model to explore the insight of network congestion. By maintaining a desired number of packets in network queue, we can achieve high bandwidth utilization and low transmission delay. To make rate control more stable and agile, a closed-loop rate control system is designed employing a Proportional-Integral (PI) controller and the control parameters are analyzed using a control-theoretic approach. Then, we adopted an expanding window reed-solomon code, and introduce an equivalent error probability to simplify them. Then we are able to formulate the optimal redundancy allocation into a constrained nonlinear optimization problem, where by allocating the redundancy unequally considering the unequal importance of different frames and their dependency based on the expanding window, unequal error protection (UEP) is achieved and the overall distortion is minimized. Based on the research above, we made refactoring of an open source VOIP software named Linphone, implemented new modules for rate control and error control, and optimized the UI to fit for TV screen. Compared to traditional real-time video streaming applications, our implementation adapts better with wireless networks and provides higher quality of video streaming.

KEYWORDS: Real-Time Video Streaming, Wireless Networks, Rate Control, Error Control, Real-Time Video System

目录

第一章 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 实时视频传输基本框架	3
1.1.2 视频码率自适应	4
1.1.3 视频传输的非对称差错保护	4
1.2 研究内容	5
1.2.1 延迟优化的实时视频码率自适应算法	5
1.2.2 实时视频传输中的非对称差错保护算法优化	6
1.2.3 面向电视盒子的实时视频通话系统	6
1.3 论文结构	6
第二章 相关研究工作	7
2.1 实时视频传输码率自适应算法	7
2.2 实时视频流的非对称差错保护	9
第三章 延迟优化的实时视频码率自适应算法	12
3.1 引言	12
3.2 带宽限制下的多流竞争分析	14
3.3 流式排队模型	15
3.4 闭环控制模型及其参数优化	16
3.4.1 比例控制器设计	17
3.5 实现细节说明	17
3.5.1 排队延迟的计算	18
3.5.2 影子价格的更新	19
3.5.3 视频码率控制	19

3.6	实验验证	19
3.6.1	实验设置.....	19
3.6.2	结果分析.....	20
3.7	本章小结	23
第四章	实时视频传输中的非对称差错保护算法	24
4.1	引言	24
4.2	基于扩展窗口的 FEC 冗余分配.....	25
4.2.1	EW-RS 框架下的丢包率计算.....	25
4.2.2	视频传输失真优化模型	27
4.3	问题建模和优化求解	28
4.4	实验验证	29
4.4.1	实验设置.....	29
4.4.2	结果分析.....	29
4.5	本章小结	31
第五章	面向电视盒子的实时视频通话系统	32
5.1	背景介绍	32
5.1.1	Linphone 项目框架.....	33
5.1.2	RTP 与 RTCP 传输协议	34
5.2	系统设计	35
5.2.1	设计框架.....	35
5.2.2	码率自适应模块	36
5.2.3	差错保护模块.....	37
5.2.4	面向电视盒子的界面优化.....	41
5.3	实验验证	42
5.3.1	实验设置.....	44
5.3.2	结果分析.....	44
5.4	本章小结	45

第六章 总结与展望	46
6.1 本文工作总结	46
6.2 未来工作展望	47
参考文献	49
硕士期间的研究成果	53
致谢	55
北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明	57

插图

1.1	2020 年移动视频流量将占移动总流量的四分之三	2
1.2	实时视频传输基本框架图	3
1.3	研究框架	5
2.1	WebRTC 算法的有限状态机模型	8
2.2	Reed-Solomon 码	10
2.3	扩展窗口 FEC 编码框架	11
3.1	流式排队模型	15
3.2	复数域控制系统框图	17
3.3	闭环控制系统框图	17
3.4	不同丢包率下算法表现, 带宽 =1Mbps, 背景延迟 =50ms	20
3.5	不同背景延迟下算法表现, 带宽 =1Mbps, 丢包率 =1%	21
3.6	不同带宽限制下算法表现, 丢包率 =1%, 背景延迟 =50ms	21
3.7	多流动态模型	22
3.8	动态码率变化	22
3.9	不同带宽限制下视频质量表现, 丢包率 =1%, 延迟 =50ms	23
4.1	不同丢包率下 PSNR 表现, 带宽 =1Mbps, 871 Kbps <i>Foreman</i> 序列	29
4.2	不同视频序列下 PSNR 表现, 带宽 =2Mbps, 序列: <i>Stefan</i> :1441Kbps, <i>Mobile</i> :1786Kbps, <i>Foreman</i> :1812Kbps, <i>Bus</i> :1890Kbps	30
4.3	逐帧 PSNR 表现, 丢包率 =10%, 带宽 =1Mbps, 871 Kbps <i>Foreman</i> 序列	30
5.1	Liblinphone 系统框架	34
5.2	Liblinphone 改进系统框架	35
5.3	码率自适应模块设计框架	36
5.4	差错保护模块设计框架	38

5.5	扩展窗口 RS 编码流程图	40
5.6	扩展窗口 RS 编码流程图	41
5.7	页面跳转逻辑	42
5.8	功能选择界面	42
5.9	拨号界面	43
5.10	通讯录界面	43
5.11	呼叫等待界面	43
5.12	差错保护模块设计框架	44
5.13	不同丢包率下系统表现	44
5.14	视频播放效果对比	45

第一章 引言

随着带有摄像功能的便携智能设备的发展,以及各种无线网络覆盖率的提升,视频通话越来越多地应用在人们的日常生活中,如可视电话、视频会议、远程医疗、在线直播等。实时视频传输对网络质量要求较高,而目前无线信道存在的带宽波动、延迟、丢包等问题,使其面临很多困难和挑战。如何提供稳定和高质量的视频服务越来越成为工业界和学术界关注的热点。为此,本课题针对在无线网络上保障实时视频传输的质量,以及提供实用的视频通话服务进行研究。

1.1 研究背景及意义

人类通信的发展经历了飞鸽传书,邮寄信件,电报,固定电话,移动电话等阶段。在互联网出现后,又涌现出 Email,网络语音,网络视频等更加方便快捷的通信形式,而移动互联网的发展更使人们随时随地都可以实现语音、视频通信。根据 Cisco 发布的全球移动数据预测报告 [1],过去的 2015 年中全球移动网络数据流量增长了 74%,达到每个月 3.7 艾字节,而到 2020 年这一数字预计将达到每个月 30.6 艾字节,人们对于移动互联网的依赖可见一斑。另一方面,如图1.1所示,2015 年移动网络数据流量中,视频数据占比重为 55%,到 2020 年预计为 75%,以 62% 的年均增长率成为移动网络中的绝对主流。可以想见,视频通话由于其实效性和丰富的信息量,必将成为人们进行各类通信的最主要方式。与此相应的是,与实时视频服务相关的产品和市场也蓬勃发展起来。日常通信方面,FaceTime、Skype、米聊等内置软件提供的视频聊天功能几乎成了智能手机系统的标配,而 QQ、微信、环聊等社交软件也纷纷加入视频聊天功能,以此为基础的小游戏、互动软件也不断被开发出来。在企业全球化的今天,视频电话会议、远程医疗等也成为各大公司必备的生产力工具,具有极大的市场潜力。越来越高清的视频质量和多样化的服务需求,也给实时视频数据的高效传输提出了巨大挑战。

高质量的视频体验依赖于较高的视频编解码质量,较低的传输延迟,以及稳定可靠的传输信道。其中任何一项不满足,都会对用户体验造成很大的影响。而在网络传输方面,由于实时性的限制,基于重传的传统 TCP 协议并不适用于实时视频的传输,

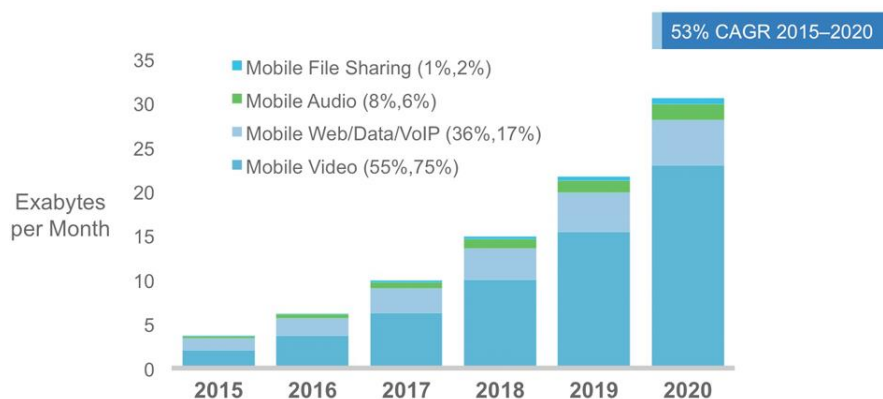


图 1.1 2020 年移动视频流量将占移动总流量的四分之三

大部分实时视频传输都使用了 UDP 传输协议。而 UDP 协议并没有对数据传输进行任何保障。无线网络信道的不稳定性，以及终端设备的多样化，也对实时视频的传输优化和质量保证带来了极大挑战。具体来说，在实时视频传输过程中面临的主要问题包括：

网络带宽 视频数据信息量丰富，对网络带宽的需求也很大，如果带宽低于视频最低压缩码率，视频通话将无法进行。同时实时视频传输一般采用的 UDP 协议本身没有拥塞控制机制，如果应用层没有进行合理限制的话，过高的视频码率将造成网络拥塞，使服务质量急剧下降。而无线网络由于终端位置移动、信号衰减等因素，带宽波动很大。

延迟 由于视频通话涉及双方交互，轻微的延迟就会造成明显的通话不连贯。另一方面，为了保证视频播放连续性，每个视频包都需要在相应视频帧播放之前到达，否则就与丢包无异。而无线网络由于信道不稳定，本身存在一定的延迟。并且如果由于带宽波动引发网络拥塞，将产生更大的延迟。

丢包率 由于视频文件编码特性，轻微的数据错误都可能造成连续画面的明显失真甚至无法解码。而无线网络下由于信号强度变化、终端移动等，发生数据错误和丢包概率大大增加。

针对以上实时视频传输和无线网络质量之间的一系列矛盾，视频码率自适应和非对称差错保护可以在很大程度上进行改善，具体体现在：

- 通过码率自适应算法及时合理地调整视频码率，可以保证网络负载始终稳定在网络承载能力以下，在实现较高带宽利用率的同时避免网络拥塞。既避免了网络拥塞引起延迟增大、丢包等影响视频传输质量的问题，又提高了视频平均码率。

- 对于信道不稳定造成的丢包，通过非对称差错保护添加冗余信息，可以为数据传输提供一定容错能力。使视频传输在高丢包环境下也能获得稳定的观看效果。

下面我们将介绍我们的算法和系统中涉及到的一些基本概念。

1.1.1 实时视频传输基本框架

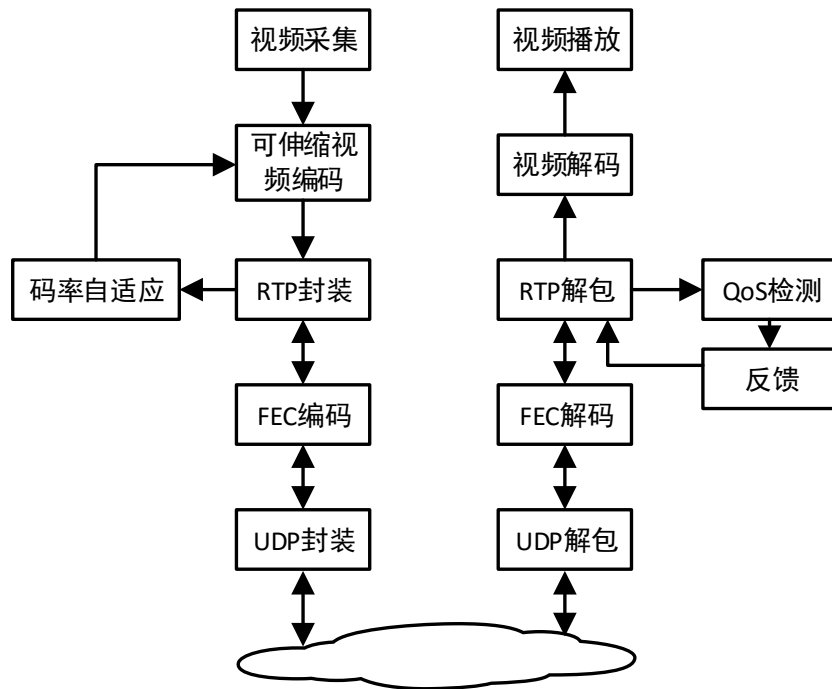


图 1.2 实时视频传输基本框架图

通常的实时视频传输系统框架如图1.2 [2] 所示。在发送端，摄像头等视频采集设备将自然场景转换为数字信号；可伸缩视频编码模块对原始视频信号进行编码、压缩等处理，生成码率可变的视频数据流；视频数据需要经过 Real-time Transport Protocol(RTP) 协议 [3] 封装，添加时间戳等信息才能正确地在接收端实时解码；为了应对丢包造成的失真，还可以在发送前对数据包进行 FEC 编码以添加冗余保护信息（可选）；最后，数据由 UDP 协议封装，通过更底层网络接口发送到接收端。这些数据包可能由于发生拥塞在网络链路上被丢弃，或由于超时而被接收端丢弃。接收端成功接收的数据包，经过一系列拆包、解码，还原为视频图像信息，并按照预定时间戳播放。

注意到视频编码器根据压缩率设置的不同，可以实时生成码率不同的数据流，这也是我们根据网络状况进行视频码率自适应的前提。为了进行码率自适应，在实时视频传输系统框架中一般还加入了位于接收端的 Quality of Service(QoS) 检测和反馈模

块，用于检测当前通信信道的带宽、延迟、丢包率等信息；这些信息通过 Real-time Transport Control Protocol(RTCP) 协议 [3] 发送给接收端的码率自适应模块，发送端根据不同的码率调整策略改变输出视频的码率。

1.1.2 视频码率自适应

自互联网诞生起，数据传输过程中的速率控制就一直是热门的研究问题。其中 TCP 协议经过多年改进，现在已经成为网络传输拥塞控制协议的主流。TCP 协议通过维护拥塞窗口以及丢包重传机制很好地保障了数据传输的可靠性。然而由于 TCP 传输过程伴随着较大的延迟，这一协议却并不适用于网络上比重越来越大的实时流媒体传输。实时视频作为一种实时流媒体，与一般网络数据传输最大的不同就是它对数据实时性的要求，一旦数据到达时间超过了有效时间，则与丢包无异。这就要求我们为实时视频传输设计专门的码率自适应算法。

在视频编码过程中，通过设定不同的质量选项，可以动态改变视频数据流的码率。例如在较差的网络条件下使用较低的视频质量，虽然损失了一定的画面清晰度，但是由于数据码率更小，至少能够保证通话过程的平滑流畅。利用这一思路，通过在通话过程中合理地调整视频码率，可以在保证通话顺利进行的前提下，尽可能提高网络带宽利用率，从而获得更好的视频体验。

1.1.3 视频传输的非对称差错保护

实时视频传输和普通文件传输的一个重要区别就是，视频数据即使发生了部分错误，仍然可以继续播放，只是部分画面会出现马赛克或丢帧，降低一定的用户体验。因此在很多视频通话应用中，差错控制模块都属于可选模块。但如果视频传输在高丢包率的网络条件下进行，过多的丢包就会对视频质量造成严重影响，需要通过一定的差错控制措施来减少丢包造成的质量损失。最常用的实时视频传输差错保护方法就是 FEC 冗余编码。

由于视频编码过程中进行了数据压缩，一个视频流中不同的数据重要性一般是各不相同的。有些数据一旦丢失会造成多个视频帧无法解码，而有些数据只会造成某一帧画面上的少量失真。一种直观的想法是在冗余编码过程中重点保护那些更重要的数据，为它们分配更多的冗余信息。这种根据数据重要程度不同进行不同程度保护的策

略成为非对称差错保护。而冗余信息分配是否合理，也在很大程度上影响了冗余保护的效果。

1.2 研究内容

基于上述背景，本文的研究框架如图 1.3所示，以面向无线网络的视频通话过程中的 QoS 保障为目标，综合运用码率自适应和非对称差错保护算法进行优化。针对无线信道不稳定的特点和实时视频通信对网络的特殊需求，本文研究主要在以下几个方面展开：首先，为了保证高效稳定的带宽利用率的前提下尽量避免拥塞和减小通话延迟，我们提出了一种基于延迟优化和控制论模型的视频码率自适应算法；然后，为了减小传输过程中的丢包对视频质量的影响，我们对视频传输非对称差错保护算法中的冗余分配这一关键环节进行了优化；最后，综合上述改进，我们基于开源代码实现了一个面向手机和电视盒子的高清视频通话应用。本课题希望从这三方面进行研究和系统设计，解决现有实时视频应用系统中存在的问题，提供高质量的视频通话服务。

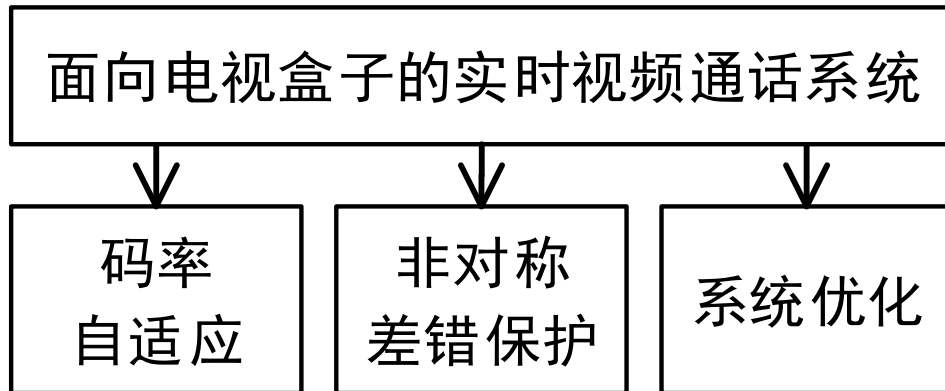


图 1.3 研究框架

1.2.1 延迟优化的实时视频码率自适应算法

高质量的实时视频传输服务要求较大且稳定的带宽、低延迟和低丢包率等，这对于网络拥塞控制也就是视频的码率自适应算法提出了很高的要求。而大部分现有拥塞控制算法主要着眼于避免网络拥塞和整体流量的公平，单个链接获取到的带宽和网络延迟往往都存在很大的波动，这极大降低了实时视频的质量。本研究通过排队延迟模型对网络进行建模，以网络延迟为输入调整视频码率，进而实现稳定高效的带宽利用。另外通过引入控制论模型和 PID 控制器进行参数优化，进一步提高了视频码率自适应

的效果。

1.2.2 实时视频传输中的非对称差错保护算法优化

基于扩展窗口的 FEC 技术具有不引入额外延迟, 控制失真扩散等特点, 特别适合无线网络上的实时视频传输。考虑到视频数据的非对称特性, 我们可以对差错保护过程进行数学建模, 求解最优的冗余信息分配策略, 来优化差错保护的效果。而由于扩展窗口的引入, 这一优化问题变得层层嵌套, 十分复杂, 直接求解的难度很大。本研究中, 我们针对扩展窗口 FEC 框架中冗余数据的分配问题进行研究。首先对这一方法进行数学建模, 得到一个最优化问题。通过对模型的分析 and 简化, 我们提出了一个简化模型和近似求解方案, 成功求解了这一最优分配问题, 从而显著提高了视频数据差错保护的效果。

1.2.3 面向电视盒子的实时视频通话系统

在上述算法研究的基础上, 本研究在一个开源 VOIP 软件的基础上进行了底层算法改进和替换, 实现了一个视频通话软件。首先在底层 RTP 和 RTCP 协议的基础上实现了一个码率自适应模块, 根据当前丢包和延迟信息实时调整视频码率。另外, 我们还实现了一个独立的差错保护模块, 对底层 RTP 包进行冗余编码和解码, 在网络丢包时对视频数据进行恢复, 从而更好地适应高丢包率的无线网络环境。最后, 考虑到未来视频通话的发展趋势, 我们还将这一系统移植到电视盒子上, 为家庭用户提供更加高质量的大屏视频通话体验。

1.3 论文结构

本论文的结构安排如下。第 1 章首先介绍了论文的研究背景和意义, 以及相关领域面临的挑战。第 2 章介绍了实时视频码率自适应和视频流差错保护方面的国内外研究现状。第 3 章以现有拥塞控制算法为基础, 考虑实时视频服务对延迟的需求, 提出了一种延迟优化的码率自适应算法。第 4 章考虑在易丢包的无线网络下进行视频传输的需求, 提出一种视频流非对称差错保护中的冗余分配算法。综合以上两种算法, 我们在第 5 章设计了一个面向手机和电视盒子的高清视频通话系统。最后在第 6 章对本文进行总结和未来工作的展望。

第二章 相关研究工作

2.1 实时视频传输码率自适应算法

自互联网诞生以来，数据传输过程中的拥塞控制就一直是研究的重点。传统拥塞控制方法，如 TCP，通过拥塞窗口 [4] 控制数据传输过程，拥塞窗口的大小决定了当前能发送的数据数量。为了探测网络带宽，拥塞窗口缓慢增加，一旦检测到网络拥塞，则大幅度降低窗口大小，以求迅速恢复。研究 [5] 指出，大部分基于拥塞窗口的控制算法都包含了数据包的重传，因此不适用于对延迟敏感的实时数据传输。为了适应实时数据传输的需要，研究 [6] 提出了一种基于码率调整的拥塞控制方法，这一方法直接估计当前网络带宽并以此设置数据发送速率。结合视频编码码率可变的特性，这一基于码率的拥塞控制方法也成为实时视频码率自适应算法的基础。

尽管 TCP 由于重传机制无法被实时视频传输采用，但其对网络带宽上限进行探测的思路却在视频码率自适应算法中得到了继承。一种经典思路就是以网络丢包率作为拥塞信号对码率进行调整，如研究 [5] 中采用算法

```

if ( $P_{loss} \leq P_{threshold}$ ) then
     $r := \min\{(r + AIR), MaxRate\}$ 
else
     $r := \max\{(\alpha * r), MinRate\}$ 
end if

```

其中 P_{loss} 为当前丢包率， $P_{threshold}$ 为判断网络拥塞的丢包率阈值， r 是发送数据的码率， AIR 为每次码率增加的数值。容易看出这是一种“加性增，乘性减” (Additive Increase Multiplicative Decrease, AIMD) 的策略。与之相应的是研究 [6] 中提出的“乘性增，乘性减” (Multiplicative Increase Multiplicative Decrease, MIMD) 策略。

一种更加直接的拥塞控制方式是通过对网络建模，显式地预测网络带宽的数值。如研究 [7] 中给出的码率估算模型

$$r \leq \frac{1.5\sqrt{2/3} * MTU}{RTT * \sqrt{p}} \quad (2.1)$$

其中 MTU (Maximum transit unit) 为当前网络最大传输单元, RTT (Round Trip Time) 为数据包往返时延。与此类似的还有专为多媒体流传输设计的 TFRC(TCP Friendly Rate Control) 协议 [8], 该协议能够合理控制码率上升速度以避免引起网络上其他 TCP 数据流的“饥饿”现象。注意到很多基于模型的拥塞控制算法已经引入了传输延迟作为网络探测的信号, 如 TCP Vegas [9]、TCP-LP [10]、LEDBAT [11] 等, 这有利于实时传输中对延迟的控制。然而上述大部分算法主要利用延迟作为避免与 TCP 过度竞争的手段, 实际应用中仍然存在延迟累积等问题。

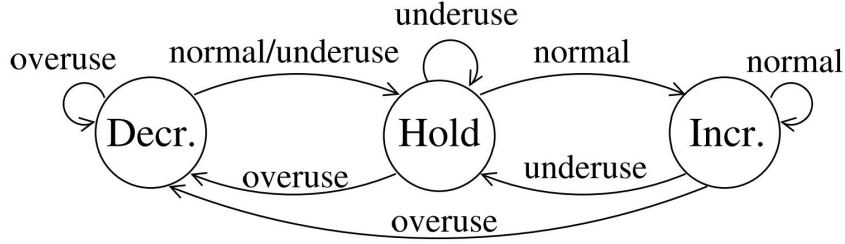


图 2.1 WebRTC 算法的有限状态机模型

以上用于实时视频的码率自适应方法都在很大程度上借鉴了传统拥塞控制算法的思想, 而随着近年来互联网的发展, 实时视频服务的研究在学术和工业界都获得了大量的关注。随着 Skype、FaceTime、WebRTC 等视频通话应用的兴起, 一系列全新的码率自适应算法也随之出现。研究 [12] 分析了 Google 在 WebRTC 中采用的发送、接收端混合码率自适应算法。其发送端采用基于丢包率的 MIMD 算法, 并综合了 TFRC 算法

$$r_t = \begin{cases} \max\{X_t, r_{t-1}(1 - 0.5p)\} & p > 0.1 \\ 1.05(r_{t-1} + 1kbps) & p < 0.02 \\ r_{t-1} & otherwise \end{cases} \quad (2.2)$$

其中 X_t 为 TFRC 算法模型估算出的网络带宽。接收端采用了基于网络延迟的算法, 并用图 2.1 所示的有限状态机描述延迟变化趋势, 状态间跳转通过专门的网络探测逻辑实现。其相应码率计算公式为

$$r_t = \begin{cases} \eta r_{t-1} & Increase \\ \alpha R_t & Decrease \\ r_{t-1} & Hold \end{cases} \quad (2.3)$$

其中 R_t 为接收端统计的当前接收速率。在开源 VoIP 软件 Linphone [13] 的底层代码中, 也发现了使用有限状态机对网络状态进行检测并针对不同状态应用不同码率调整策略

的算法。

尽管实时多媒体流传输的码率控制问题已经获得了大量关注并在学术和工业界出现了各种算法，但目前还没有一种算法在效果方面得到广泛认同。目前互联网工程任务组 (The Internet Engineering Task Force, IETF) 仍有一个工作组 RMCAT [14] 负责收集用于音视频实时传输的拥塞控制算法。这也是在我们的研究中努力解决的一个问题。

2.2 实时视频流的非对称差错保护

在网络传输过程中，由于网络拥塞、路由器转发错误、信道错误等问题不可避免地会发生丢包。视频编码传输过程中为了压缩数据量采用的帧内和帧间压缩策略使其对数据错误十分敏感，一旦发生错误或丢包，可能对视频解码过程产生非常严重的影响，造成连续多帧的失真 [15]。因此我们有必要在传输过程中进行差错控制。

信道上的差错控制技术就是传统的信道编码，是为了克服信道错误而采取的必要措施。信道编码在发送端以某种确定的关联规则（约束）计算校验码元或监督码元，附在被传输的信息序列上。接收端按照既定的规则检查相应码元，如果传输过程中有信息错误或丢失，将会检测到关联信息的变化，从而实现发现错误，乃至纠正错误 [16] [17] [18]。基于信道编码的差错控制主要包括检错重传和前向纠错两种：

检错重传 (Auto Repeated Request, ARQ) [19] [20] 通过在发送数据包中添加一定冗余编码达到检错目的。接收端进行完整性检验，一旦发现丢包，则向发送端反馈重传请求，发送端重新发送数据包。此过程一直重复直到接收端收到正确的数据包。这是 TCP 协议中最重要的数据保障策略，然而在实时传输中并不适用。

前向纠错 (Forward Error Correction, FEC) [21] 通过向发送数据中添加一定量冗余数据，同时提供数据检错和纠错能力。只要错误和丢包数量不超过一定阈值，接收端就可以解码恢复所有原始数据。这一方法不需要反馈信道，比 TCP 实时性好 [22]，因此是需要纠错能力的实时视频传输中常用的方法。

在实时流媒体传输中，使用最多的 FEC 编码包括 LDPC [23] 和 Reed Solomon(RS) 编码 [24]，它们也是在 RTP 协议中推荐的差错保护编码方式。RS 编码是一种扩展的非二进制 BCH 码，在 $GF(2^m)$ 域上进行运算。典型的 RS 码可以用 $RS(N, K)$ 表示，其中 N 为编码码块长度， K 为码块中的信息长度， $k = N - K = 2t$ 表示校验码的符号数， t

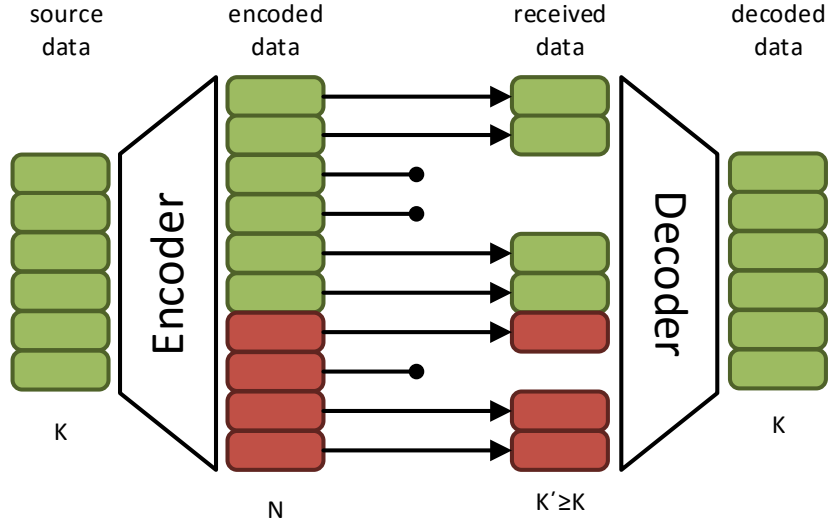


图 2.2 Reed-Solomon 码

表示能纠正的错误数目。另外如果错误位置已知，那么 RS 码可以纠正 k 个错误。RS 码也是一种系统码，即 K 个信息码元在编码之后不会发生改变。RS 码的简要编解码过程如图 2.2 所示。

在实时视频数据流中，不同位置的数据重要性是不同的。例如在 MPEG 中，I 帧具有比 P 帧更重要的地位，而 P 帧又比 B 帧重要。研究 [25] [26] [27] [28] 表明，在视频传输中使用非对称的冗余编码能够获得更好的差错保护效果。研究 [25] 中提出基于失真权重的预期错误传播长度优化模型进行冗余分配。研究 [26] 利用失真最优化的思路对冗余分配问题进行抽象表示如下：

$$\begin{aligned} \min_{\vec{F}} D(\vec{F}) &= \sum_{j=1}^J D_j P_R(N_j, K_j) \\ \text{s.t.} \quad R_C(\vec{F}) &\leq R_T - R_S \end{aligned} \quad (2.4)$$

其中 D_j 表示第 j 个 BOP(Block of Pictures) 的整体失真， P_R 是 $RS(N_j, K_j)$ 进行冗余编码后的丢包率， $R_C(\vec{F})$ 表示冗余分配的码率限制。求解这一带约束的优化问题即可得到最优冗余分配。然而，大部分 FEC 框架的冗余保护效果依赖于较大的编码块，而包含多帧数据的编码块会引入额外的播放延迟，这对实时视频传输的效果有很大影响 [18]。

随着相关研究的深入，一种能解决 FEC 编码块大小和额外延迟之间矛盾的扩展窗口 RS 编码框架 (Expanding Window Reed-Solomon code, EW-RS) 被提出 [29]。该框架编码过程如图 2.3 所示，GOP 中第 n 个视频帧的冗余数据包 C_n 包含的编码块由第 $1 \leq i \leq n$ 帧的所有数据包组成。通过这一扩展窗口的编码块设置，编码块大小在不

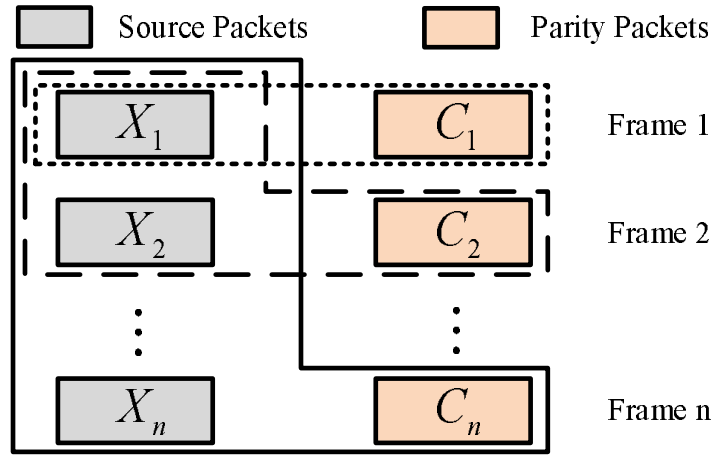


图 2.3 扩展窗口 FEC 编码框架

引入额外播放延迟的条件下得到了很大的增加。值得一提的是，这一框架还包含了非对称差错保护思想，即越靠前的数据包得到越多的保护。在 [29] 和 [30] 中，基于扩展窗口的喷泉编码模型被提出；基于扩展窗口的可伸缩视频编码（SVC）也在 [31] 和 [32] 中被提出。在一项最近的工作 [33] 中，作者提出了基于源数据包随机交换的 Reed-Solomon 扩展窗口编码框架。

第三章 延迟优化的实时视频码率自适应算法

3.1 引言

随着移动智能设备和移动网络的普及，基于无线网络的实时视频通信的应用也越来越广泛。然而，在无线网络上进行实时视频传输还面临着带宽、延迟波动，物理链路丢包等挑战。为了避免网络拥塞引起的路由器主动丢包、延迟波动和带宽浪费，传统网络应用都需要采用 TCP 协议等对数据流进行拥塞控制。而在实时视频传输中，我们也必须要对视频流进行码率自适应。

视频传输码率自适应算法一直是一个活跃在学术界和工业界的热门问题，并且在 TCP 等传统拥塞控制算法的基础上发展出了不同的实现思路和方法。本文从输入信号以及控制方式两个角度对主流实时视频码率自适应方法进行了分类。

首先，视频码率自适应算法作为一种网络拥塞控制算法，针对网络的负载状况反馈进行针对性的码率调整，必然要以网络真实参数作为输入信号，这些信号包括：

丢包 尽管无线网络由于信道质量差，发生丢包的概率较大，但丢包最主要的原因还是网络发生拥塞后在路由器上进行的主动丢包。因此，丢包也成为传统拥塞控制协议探测网络丢包的最主要手段。尽管如此，丢包信号应用在面向无线网络的数据传输中却并不合适。这是因为无线网络由于物理信道质量差，在没有网络拥塞的情况下丢包率也比较高，这会使拥塞控制算法低估网络带宽，造成带宽浪费。而且一旦网络拥塞引起了丢包，就说明网络已经发生了严重拥堵，这时延迟和抖动都非常严重，对实时视频通话效果的影响将很难恢复。

传输延迟 数据从准备发送到成功接收之间的端到端延迟，通常用 Round Trip Time(RTT)衡量，主要包括：发送端数据处理、各中间路由器转发前的排队缓存、数据推送到传输介质以及数据在传输介质中传播四种不同延迟组成。其中唯一随网络状况有较大变化的就是数据包在中间路由器的排队缓存时间（我们称之为排队延迟），网络负载越大，缓存时间越长，排队延迟越大。因此，网络延迟也成为使用越来越多的拥塞控制信号。相对丢包而言，以网络延迟作为拥塞信号，可以根据延迟的增减情况判断网络状况的渐进变化，提前对视频码率进行调整以避免出现网络

延迟，因而可以很好地保证视频数据传输的平稳高效。

抖动 如果网络带宽、负载波动较大，就会使延迟出现较大波动，这一抖动尤其对延迟敏感的实时传输影响较大。因此延迟的相对抖动也成为视频码率自适应中需要参考的一种重要网络信号。

另外，从拥塞控制方式的角度，我们还可以将主流拥塞控制算法分为以下三类：

基于探测的控制 这类拥塞控制算法通过不断增加码率，直到网络达到某一可检测的阈值（例如丢包率达到某一阈值 P_{th} [5]）来对网络带宽进行探测。常用的探测过程包括 AIMD 和 MIMD 两种。这一控制方法通过控制网络保持在拥塞阈值之下避免拥塞，但这一方法也导致网络延迟一直保持在较高水平。另外，当网络达到阈值时，为了避免即将发生的拥塞，必须大幅度降低发送速率（乘性减），因此发送码率波动较大，带宽利用率也相应较低。

基于模型的控制 与上述方法隐式估计网络带宽不同，基于模型的拥塞控制对网络建立公式描述，并计算相应的发送速率，以此显式地估计网络带宽。一种典型的应用是 TFRC 协议。

基于状态机的控制 随着视频通话应用不断涌现，在实际工程中一种基于状态机的算法应用越来越广泛。这一控制方法通过状态机对网络的不同状态进行描述，并通过一定条件触发状态间的转移。对于不同的网络状态，则采取不同的码率调整策略。通过对状态机的状态、跳转、行为等进行较细致的定义，可以给出比较复杂的控制系统，拟合不同的网络情境并结合应用测试中的经验。但这也成为该控制方法的一个缺点：模型和参数设定过分依赖工程经验，没有系统的优化方法，缺少理论支持。

针对现有码率自适应算法的不足，我们希望设计一种针对无线网络上的实时视频传输的码率自适应算法，综合考虑无线网络高丢包的特点以及实时视频低延迟、稳定带宽的需求。这一算法的实现目标包括：

- 较高的抗丢包能力
- 稳定的低传输延迟
- 较低的带宽波动

- 多流竞争公平性

为了实现上述目标，我们以控制论为基础，结合对网络排队延迟的建模，设计了一种延迟可控的视频码率自适应算法。首先，通过对带宽限制下的多流竞争系统建模和推导，我们引入了一个流式排队模型来对网络数据流的高效、稳定、公平传输进行分析。在这一流式排队模型中，通过控制排队延迟在一定范围内波动就可以完成网络拥塞控制。一种直观的理解是：当排队延迟超出预定值或增长过快时，通过及时降低视频码率来避免网络拥塞；当排队延迟低于预定值或下降过快时，通过提高视频码率来充分利用过剩的网络带宽。同时基于这一控制策略，我们结合控制论建立了闭环控制模型。由于该模型的非线性特征不利于进一步分析优化，我们该模型进行了线性化，并引入比例微分控制器提高系统性能。同时通过分析系统的稳定性和响应时间，对参数进行优化。

3.2 带宽限制下的多流竞争分析

在网络传输过程中，我们希望在有限的网络带宽限制下，为所有共享这一网络的用户提供更高的整体效用，这一问题可以用如下带约束的优化问题描述：

$$\begin{aligned} \max_{x_i} \quad & \sum_{i=0}^N U(x_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=0}^N x_i \leq C \\ & x_i \geq 0, i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (3.1)$$

x_r 表示第 r 条数据流的发送速率， $U(x_r)$ 表示第 r 条流在发送速率 x_r 条件下获得的效用。所有数据流的发送速率 x_r 之和必须小于网络带宽 C 且不能为负数。在最优化问题中，拉格朗日乘数法是一种寻找多元函数在变量受到一个或多个条件的约束时的极值的方法。此问题中我们引入拉格朗日乘子 λ 并得到如下拉格朗日函数：

$$\max L(x_i, \lambda) = \sum_{i=0}^N U(x_i) + \lambda (C - \sum_{i=0}^N x_i) \quad (3.2)$$

其中拉格朗日乘子 λ 也被称为影子价格。求解这一无约束形式的一阶条件包含如下约束：

$$\frac{\partial L(x_i, \lambda)}{\partial x_i} = U'(x_r) - \lambda = 0 \quad (3.3)$$

在式 3.3 中，由于我们还未给出 $U(x)$ 的定义，因而暂时无法求解式 3.1 中的优化问题。根据常识可知， $U(x)$ 满足边际效用递减原理（即码率越大，增加单位码率对效用的提升越小），记为 $U'(x) < 0$ 。因此，尽管模型参数还未确定，我们可以使用渐进法逐步逼近 x 的准确值。渐进法形式如下：

$$x'_i = k(U'(x_i) - \lambda) \quad (3.4)$$

3.3 流式排队模型

如果短时间内进入网络的数据包数量超出了网络的处理能力，就会在中间路由器堆积，形成网络拥塞。并进一步引起排队延迟增大，甚至路由器缓冲区溢出后发生大量丢包。

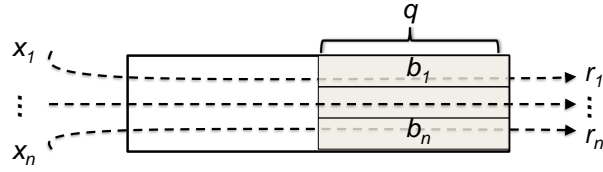


图 3.1 流式排队模型

为了描述这一过程，我们通过图 3.1 所示的流式排队模型来对网络链路进行建模。链路中间路由器可以简化为一个进行“缓存-转发”的缓冲区，如图 N 个数据流在同一链路上进行数据传输，向缓冲区中输出数据包以竞争带宽资源。假设第 i 条流占据的缓冲区数据量为 b_i ，其数据发送速率为 x_i ，那么整个缓冲区队列的入队速率为 $\sum_{i=1}^N x_i$ ，其排空速率则始终等于网络带宽 C 。从这一缓冲区的角度，有：

$$b'(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) - C \quad (3.5)$$

其中 $b'(t) = db/dt$ 代表缓冲区大小随时间 t 的变化速率。

图中 q 表示前文提到的排队延迟，其含义为数据包在整个传输过程中，由于中间路由器缓冲区不为空而等待的时间。根据排队论，有：

$$q(t) = \frac{b(t)}{C} \quad (3.6)$$

考虑到单个网络流没有链路上的其他数据流的信息，为了达到系统的稳定公平，我们基于第 3.2 节的分析，结合已有研究引入了基于影子价格 [35] 的模型。首先根据视频数据的率失真曲线 [36] 赋予每条数据流权重 ω_i ，该权重值使每条视频数据流基于率

失真公平性竞争带宽。数据流对于获取的带宽需要付出价格为 $p_i(t)$ 的拥塞代价。利用失真权重和影子价格的码率控制模型可以描述为

$$x'_i(t) = \omega_i - x_i(t)p_i(t) \quad (3.7)$$

其中 $x'_i(t) = dx_i/dt$ 代表码率随时间的变化速率。

所有视频流根据式3.7调整视频码率。当网络接近拥塞时，码率较高的视频流由于付出更大的拥塞代价，码率下降更快。最后，所有视频流都稳定在失真公平的码率附近。与同样基于传输延迟进行码率控制的 FAST TCP [37] 协议不同的是，我们通过式3.7解耦了码率控制和延迟之间的直接关系，从而避免了延迟累积。

3.4 闭环控制模型及其参数优化

为了简化分析，我们假设所有网络用户是同质的，即他们具有同样的权重 ω_i 和稳态发送速率 x ，这样式3.5-3.7可以简化为

$$x' = \omega - xp \quad (3.8)$$

$$b' = Nx - C \quad (3.9)$$

$$q = \frac{b}{C} + t_p \quad (3.10)$$

从控制论的角度看，上述系统是一个分析难度很大的非线性系统。为了简化分析，我们在其稳定点取差分，从而将其等效转化为线性系统。记其稳定点的影子价格为 p_0 ，对应发送速率为 x_0 ，根据式3.5-3.7，有：

$$\omega = x_0 p_0 \quad (3.11)$$

$$x_0 = \frac{C}{N} \quad (3.12)$$

对各参数差分为 $\delta p(t) = p_0 - p(t)$ ， $\delta x(t) = x_0 - x(t)$ 和 $\delta q(t) = q_0 - q(t)$ ，有：

$$\delta b'(t) = \sum_{i=1}^N \delta x(t) \quad (3.13)$$

$$\delta q(t) = \frac{\delta b(t)}{C} \quad (3.14)$$

$$\delta x'(t) = -p_0 \delta x(t) - x_0 \delta p(t) \quad (3.15)$$

根据控制论理论，对式3.13-3.15进行拉普拉斯变换后可以得到该控制系统在复数

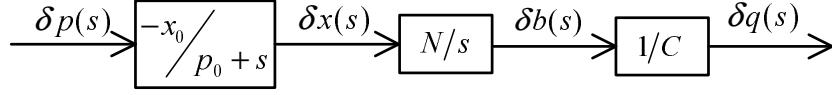


图 3.2 复数域控制系统框图

域的控制框图如图3.2所示。

在该控制模型中，我们的主要目标是以排队延迟作为系统反馈，来控制数据流的影子价格 p 。根据图3.2及控制论知识，我们使用控制器

$$\delta p(s) = G_c(s) \delta q(s) \quad (3.16)$$

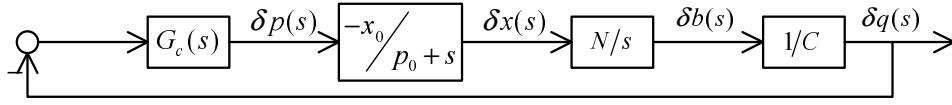


图 3.3 闭环控制系统框图

完成这一控制过程，从而形成一个闭环反馈控制系统，其框图如图3.3。

3.4.1 比例控制器设计

为了优化我们的闭环控制系统的效果，我们选择比例控制器对影子价格进行控制

$$G_c(s) = K_P \quad (3.17)$$

结合图3.3和式3.17，可以推导出该闭环控制系统的转移方程为

$$H(s) = \frac{K_P}{s^2 + s p_0 + K_P} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (3.18)$$

其中 ζ 代表系统的阻尼比， ω 代表系统的固有频率。由上式可知 $2\zeta\omega = p_0$ 且 $\omega^2 = K_P$ ，从而得到 $\zeta = \frac{p_0}{2\sqrt{K_P}}$ 。为了得到良好的系统响应，我们根据传统的阻尼比优化，取 ζ 为 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ [38]，则

$$K_P = \frac{p_0^2}{2} \quad (3.19)$$

系统的 5% 稳定时间为 $t_s = \frac{6}{p_0}$ 。

3.5 实现细节说明

为了集中精力在视频码率控制的优化上，我们基于一个成熟的开源实时视频通话测试平台，Mediastreamer2，搭建了算法测试平台。基于视频码率自适应算法，我们实

现了一个包含反网络信息采集和发送、最优码率计算等功能的码率自适应模块。除此之外的大部分功能（如视频采集、码率可变编解码等）都沿用了已有实现。本节中，我们简要介绍一些系统实现中的重要细节设计。

3.5.1 排队延迟的计算

在数据传输过程中，传输延迟定义为数据包从发送端开始发送到接收端成功接收之间的时间间隔。其直观测量方式就是对数据包发送和接收时刻分别获取当前时间并作差，这一差值定义为单向延迟 (One Way Delay, OWD)。然而，由于发送和接收两个客户端的时间设置很难保证完全同步，在单向延迟的计算中一个无法排除的误差就是时钟偏差。因此，在实际网络应用中，衡量网络延迟使用的一般是往返时延 (Round-Trip Time, RTT) 这一变量，表示从发送端发送数据开始，到发送端收到来自接收端的确认（接收端收到数据后便立即发送确认），总共经历的时延。

在视频通话过程中，视频流是双向同时进行的，但由于网络环境的多样性，不同方向上的网络状况可能存在很大区别。如果采用 RTT 作为延迟信号，我们只能获得上下行两个方向上的延迟之和，因而无法针对单向链路进行针对性的码率调整。在本研究中，利用即将给出的排队延迟的特性，我们可以消除单向延迟存在时钟偏差的问题，因而可以采用单向延迟进行更加精确的码率调整。

由单向延迟的定义我们知道

$$OWD = D_q + D_t \quad (3.20)$$

其中 D_q 为排队延迟， D_t 为除排队延迟以外的其他延迟，这部分延迟主要与网络物理环境有关，因此连接建立后变动很小。因此，我们可以通过如下方式计算排队延迟

$$D_q = OWD - OWD_{min} \quad (3.21)$$

其中 OWD_{min} 是传输过程中单向延迟的最小值，在每次计算单向延迟时更新，我们认为这一最小值可以很好地估计网络的固定时延。同时在对单向延迟作差的过程中，我们已经消除了时钟偏差这一误差。

3.5.2 影子价格的更新

由前述比例控制器，有

$$\delta p = K_P \delta q \quad (3.22)$$

在系统实现角度，我们不可能提前知道系统稳态对应的影子价格 p_0 。为了避免系统对初始值的依赖，我们对式3.22取差分形式

$$\delta p(t) - \delta p(t-1) = K_P(\delta q(t) - \delta q(t-1)) \quad (3.23)$$

则有

$$\delta p(t) = \delta p(t-1) + K_P(\delta q(t) - \delta q(t-1)) \quad (3.24)$$

通过这一变形，我们可以在系统运行过程中逐步逼近正确的影子价格，同时根据式3.19动态更新相应的 K_P 值。

3.5.3 视频码率控制

根据式3.7，我们可以计算视频码率相对于时间间隔 ΔT 的变化率 x' ，从而通过下式计算下一时刻的目标码率

$$x(t) = x(t-1) + x'(t)\Delta T \quad (3.25)$$

我们在每个时间片起始时更新视频码率。系统启动时，视频码率被设定为编码器允许的最小值，如 64Kbps。

3.6 实验验证

本小节中，我们基于实验平台对我们的码率自适应算法进行了测试，并与几种主流拥塞控制算法进行了对比。

3.6.1 实验设置

我们用三台主机组成测试平台，其中一台作为中转机，上面运行带宽控制软件 Network Emulator for Windows Toolkit (NEWT) 来对网络链路进行仿真模拟，包括带宽限制、丢包控制和背景延迟控制等。另外两台主机分别作为发送端和接收端与中转机

连接。

通过理论分析和实验测试，我们对部分参数的取值进行了优化。如码率调整的时间间隔 ΔT 设置为 1s。为了平衡带宽利用率和延迟约束，将目标排队延迟设置为 $q_0 = 100\text{ms}$ 。

在对比测试中，我们选择了经典的基于模型的码率控制算法 TFRC 协议，和基于 AIMD 控制的 CTCP 协议。其中 TFRC 协议通过一个关于丢包率和 RTT 的函数来计算发送速率，而 CTCP 协议作为基于探测的拥塞控制的代表，通过加性增长，乘性降低来隐式估计网络带宽。

在本研究的实验验证中，我们主要关注码率自适应算法在三方面的表现，分别是：代表传输质量的平均码率和码率稳定性，同算法间码率分配公平性，以及代表服务质量的 PSNR。其中平均码率在接收端码率稳定 60s 之后开始记录。码率稳定性通过码率的标准差衡量如下

$$Stability = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

码率分配公平性通过多流竞争条件下的各条流的平均码率进行比较。PSNR 可以通过比较发送端的输入 CIF 序列和接收端解码的 CIF 序列获得。

3.6.2 结果分析

3.6.2.1 平均码率和码率稳定性

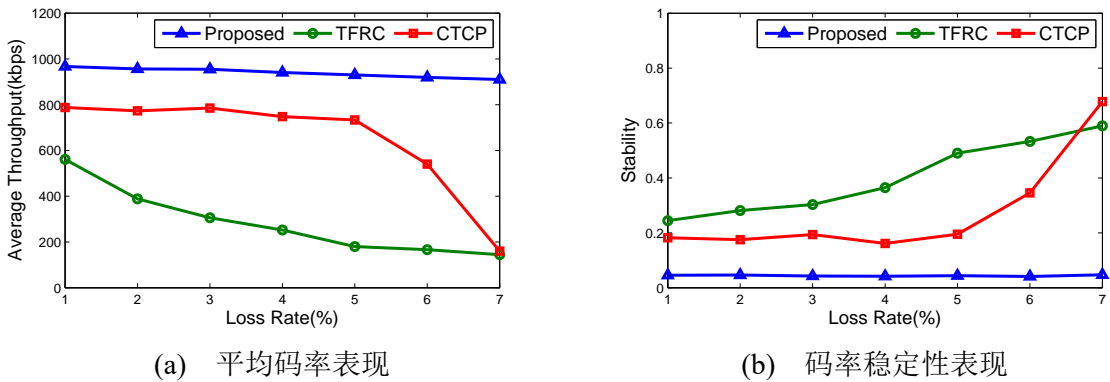


图 3.4 不同丢包率下算法表现，带宽 = 1Mbps，背景延迟 = 50ms

我们首先对平均码率和码率稳定性在不同算法间进行测试。图3.4展示了不同丢包率的网络场景。可以看出我们的算法始终具有更好的表现。这主要由于我们的算法使

用排队延迟而不是丢包作为网络拥塞信号，使其能够排除网络固有丢包对拥塞判断的影响。另外得益于控制论参数优化，尽管丢包率不断增大，我们的算法仍保持了较好的平均码率和码率稳定性水平。

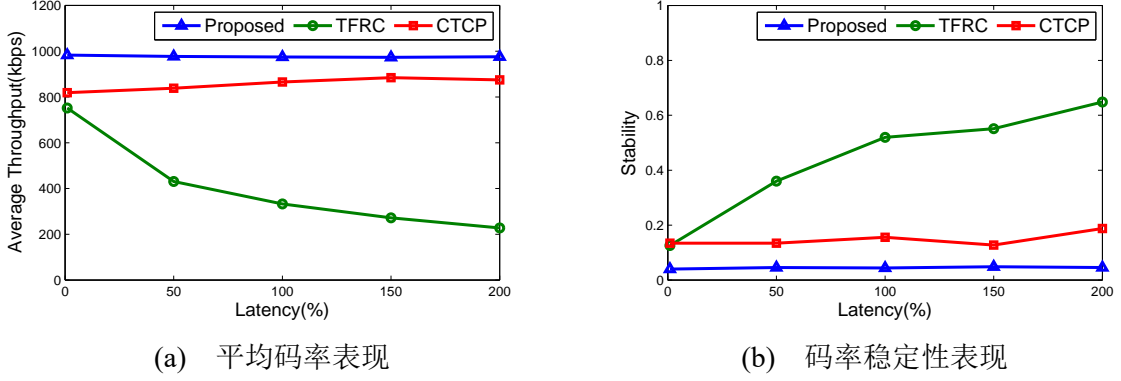


图 3.5 不同背景延迟下算法表现，带宽 = 1Mbps，丢包率 = 1%

同时，我们比较了不同背景延迟条件下几种算法的表现，结果如图3.5。从结果中可以看到，当延迟水平比较低时，所有算法都能得到较大的平均码率，随着延迟增大，基于延迟进行控制的 TFRC 算法平均码率急剧下降，而 CTCP 算法由于不考虑延迟变化，因此不受影响。我们的算法通过延迟优化，始终能保持较高的平均码率和较好的码率稳定性。

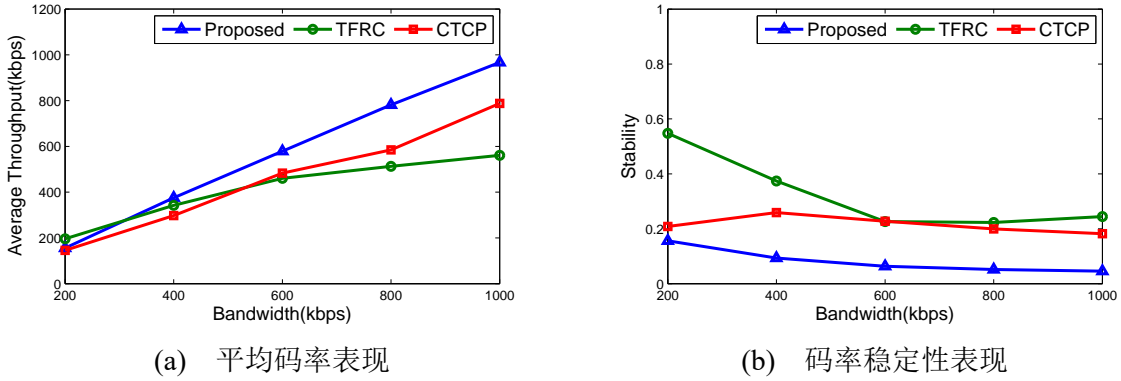


图 3.6 不同带宽限制下算法表现，丢包率 = 1%，背景延迟 = 50ms

最后，我们比较了不同网络带宽限制下几种算法的表现，如图 3.6。与前几项实验结果相同，我们的算法在不同环境中均表现出更好的效果。由于我们采用了排队延迟作为码率调整的主要信号，因而可以提前发现网络状况的波动，并通过改变码率来逼近实际带宽。另外得益于我们利用控制论进行的参数优化，保证了我们的码率自适应算法过程更加平滑、结果更加准确。

3.6.2.2 动态公平性

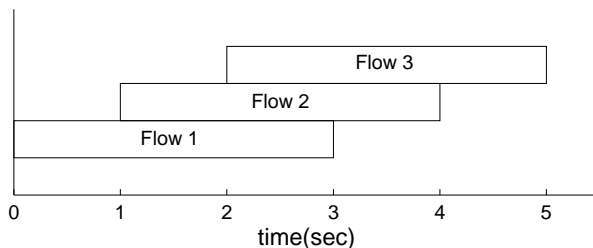


图 3.7 多流动态模型

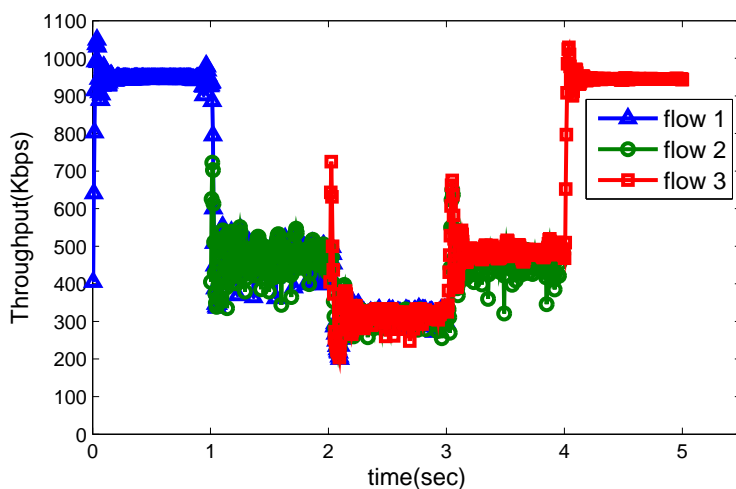


图 3.8 动态码率变化

除了静态网络中的测试以外，码率自适应算法在动态网络中能否迅速反应带宽变化也是评价的重要标准。本项测试中，我们选择三条数据流分别在不同时间启动和终止，如图3.7所示。在发送端，我们记录每条流的动态视频码率，结果如图3.8。结果表明，我们的算法对网络波动反应迅速准确，并且每条流都能获取的均等大小的网络带宽。

3.6.2.3 视频质量

最后，我们比较了不同带宽限制下，三种码率自适应算法在接收端视频的 PSNR 质量表现，结果如图3.9所示。可见我们的算法在不同带宽下均能获得视频质量的显著提升。这主要得益于我们使用的比例控制器优化，及基于排队模型的延迟优化，使其能够获得更高的平均码率和码率稳定性。

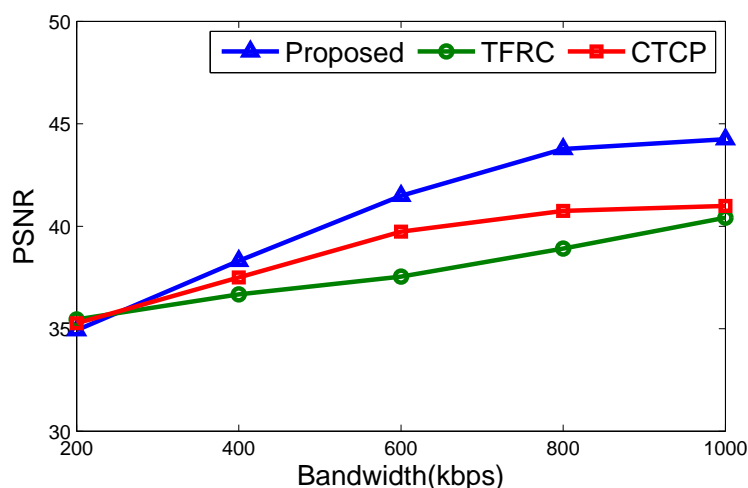


图 3.9 不同带宽限制下视频质量表现, 丢包率 = 1%, 延迟 = 50ms

3.7 本章小结

本章中, 我们针对无线网络中的实时视频传输, 提出了一个分布式、延迟可控的码率自适应算法, 满足了视频传输中的低延迟、带宽稳定、高带宽利用率等需求。我们首先通过对网络建模分析, 提出了简化网络链路的排队延迟模型, 并引入了影子价格和失真权重参数来更好地实现拥塞控制和多流公平。通过建立闭环反馈控制模型, 并引入比例控制器进行参数优化, 使得控制过程更加高效、平滑。另外, 我们实现了一套完整的算法测试平台, 并对算法进行了系统实现和大量效果测试。实验表明, 相比于其他主流码率自适应算法, 我们的算法在带宽利用率、稳定性, 视频质量等方面都有更好的表现。

第四章 实时视频传输中的非对称差错保护算法

4.1 引言

上一章已经提到如何在无线网络中更好地进行码率自适应，以减少网络拥塞发生，避免丢包。然而对于物理链路错误或路由器转发错误造成的丢包是无法避免的。为了解决这一丢包问题，广泛采用的方法是对数据进行 FEC 冗余保护。在第 2.2 节我们已经介绍了实时视频传输中常用的 FEC 算法，以及在编解码效果、额外延迟、非对称差错保护等方面的权衡和优化。在这些方法中，基于扩展窗口的 RS 编码 [29] 表现出更多适合实时视频传输的优点：

- 随着编码窗口扩展，编码块大小不断累积增加，在 FEC 编解码效率方面能得到较好的保障。
- 所有视频帧的编解码过程都只参考了当前和更早的视频帧，没有引入额外的编解码延迟。
- 越往前的视频帧，涉及到的编码块也越多，因而受到更多的冗余保护。这一特性恰好满足了非对称差错保护的要求。

但是在应用过程中，这一框架也存在一些问题，主要体现在：由于冗余分配优化问题复杂度很高，这一扩展窗口框架都采用了平均分配冗余的方案，并没有达到最高效率的冗余数据利用。在之前的分析中我们已经知道冗余分配主要以整个 GOP 的失真最小化为目标，这一过程需要求解每个视频帧在 FEC 编码后的丢包概率，而在扩展窗口框架下，视频帧的解码概率是非常复杂的，这也使得非对称差错保护在扩展窗口框架很难得到有效利用。

在本研究中，我们主要关注基于扩展窗口的 FEC 编码框架中，进行非对称差错保护并优化其效果的问题。首先，我们引入一种基于扩展窗口的 Reed-Solomon 编码框架并对其进行数学建模分析，提出其成功解码的充要条件。通过对编解码模型的分析并引入等效模型简化计算，我们得到了视频帧丢帧概率模型。结合视频帧对整体失真的影响大小，可以得到非对称保护中最关键的失真优化问题。最后我们通过简化的贪心算法解决了这一优化问题，得到 GOP 中的最优冗余分配方案，达到更好的非对称差

错保护效果。实验表明，我们的算法在各种网络条件下，都能显著提高受保护视频的 PSNR 表现。

4.2 基于扩展窗口的 FEC 冗余分配

在数据不可靠的网络中，FEC 是一种有效的检错、纠错方法。然而，在 FEC 的保护效果和引入的额外延迟之间一直存在妥协：编码块越大，编码效率越高，额外延迟也越大；编码块越小，额外延迟越小，而编码效率也越低。在延迟敏感的实时视频传输中，这一问题变得更加突出。

为了平衡编码效率和延迟之间的矛盾，我们采用了图 2.3 所示的扩展窗口 RS 编码框架 (EW-RS)。在发送端，每一视频帧与同一 GOP 中所有之前的视频帧数据同时编码。在接收端，奇偶校验方程包含了所有 GOP 中之前的数据，并求解出丢失的数据包。由于后续视频帧的校验码中都包含了之前视频帧的数据信息，可以用于回复前面丢失的数据包，这也在一定程度上实现了非对称差错保护。同时由于所有编解码都只引用了当前和之前的数据包，因此整个过程不会引入额外延迟。

由于这一框架的编码块层层嵌套，添加冗余后各视频帧在丢包情况下解码概率的提升程度很难被准确计算，因而也无法套用常规的非对称差错保护分析框架进行冗余分配。接下来我们会通过一系列变换和简化解决这一问题，推导出最优冗余分配方案。

4.2.1 EW-RS 框架下的丢包率计算

对于一个 GOP，假设其包含 N 个视频帧，其中第 n 帧的数据包和相应校验包数量分别记为 k_n 和 r_n 。我们采用的 Reed-Solomon 编码可以表示为一个 $RS(\hat{N}, \hat{K})$ [24] 系统，其中 \hat{N} 是编码块大小， \hat{K} 是编码块中的源数据包数量。接收端能够成功解码该编码块的条件是，接收到任意源数据包或校验包的总数量大于 \hat{K} 。针对我们采用的扩展窗口框架，某一视频帧 n 的解码条件为：

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_1 & = \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{A}_2 (\mathbf{X}_1^T, \mathbf{X}_2^T)^T & = \mathbf{C}_2 \\ \dots & \\ \mathbf{A}_n (\mathbf{X}_1^T, \mathbf{X}_2^T, \dots, \mathbf{X}_n^T)^T & = \mathbf{C}_n \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,k_i})^T$ 是 $k_i \times 1$ 矩阵，代表第 i 视频帧的所有源数据包； $\mathbf{C}_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,r_i})^T$ 是 $r_i \times 1$ 矩阵，代表第 i 视频帧的所有校验包。每个丢失的数据包都对应 \mathbf{X}_i （源数据包）或 \mathbf{C}_i （校验包）中的一个变量。 \mathbf{A}_i 是 $r_i \times \sum_{j=1}^i k_j$ 矩阵，代表第 i 帧的奇偶校验矩阵。注意到变量 \mathbf{X}_i 包含在序号为 $j, j \leq i$ 的所有校验方程中，并且通过对系数矩阵 \mathbf{A}_i 进行随机化，基本保证了式4.1中的方程组为满秩 [33]。

为了得到每一视频帧的丢帧概率，我们首先对式4.1进行分析，并总结出两条基本命题如下：

推论 4.1 在 EW-RS 框架中，如果第 n 个视频帧能够解码，那么同一 GOP 中所有之前的视频帧也都能够解码。

证明：根据图2.3和式4.1，第 n 视频帧的校验包对应的编码块包含了所有当前和之前帧的数据包，第 n 帧解码对应了该编码块成功解码，这也就意味着所有数据包都能够解码。 ■

推论 4.2 记 l_i 为第 i 视频帧丢失数据包的数量，那么视频帧 n 成功解码的充要条件为：

$$\begin{cases} l_n \leq r_n \\ l_{n-1} + l_n \leq r_{n-1} + r_n \\ \dots \\ \sum_{j=1}^n l_j \leq \sum_{j=1}^n r_j \end{cases} \quad (4.2)$$

证明：我们使用反证法证明此推论。对于式4.2.1中的约束，假设存在 k 使得 $\sum_{i=k}^n l_i > \sum_{i=k}^n r_i$ ，同时视频帧 n 仍然能够成功解码。记第 k 到 n 帧的所有奇偶校验方程组成子方程组 \mathcal{E} ，则该方程组的秩为 $\sum_{i=k}^n r_i$ ，即帧 k 到 n 的所有校验包的数量。根据推论4.1可知，此时 GOP 中 1 到 n 的所有视频帧均能够成功解码。那么对于方程组 \mathcal{E} ，其未知数量为 $\sum_{i=k}^n l_i$ 大于方程组的秩，这与方程组求解条件矛盾。 ■

推论4.1表明如果某一视频帧能够解码，其同一 GOP 中所有之前的视频帧都能够解码，因此 GOP 序列中视频帧间的依赖被消除。推论4.2给出了某一视频帧能够成功解码的充要条件。为了达到优化冗余分配的目的，我们必须定量分析每一视频帧在 FEC 编码条件下的解码概率，而式给出的条件显然无法满足正常复杂度下的求解。因此，

我们首先通过迭代的形式给出视频帧 n 解码概率的公示表示如下

$$P(n) = 1 - \sum_{i=0}^{r_n} (\mathcal{F}(k_n + r_n, i, p) \sum_{j=0}^{r_n-i} \mathcal{F}(\sum_{z=1}^{n-1} k_z, j, \bar{P}(n-1))) \quad (4.3)$$

其中 $\mathcal{F}(a, b, c) = \binom{a}{b} c^b (1-c)^{a-b}$ 是二项式概率密度函数, p 代表信道数据传输的错误率 (丢包率)。在扩展窗口框架下, 不同帧的数据包具有不同的丢包概率, 为了简化计算, 我们在迭代计算过程中, 近似认为所有数据包丢包概率相等, 对于第 1 到 $n-1$ 帧, 其等效丢包概率定义为 $\bar{P}(n-1)$ 。根据定义, 用 $\bar{P}(n-1)$ 或 $P(n-1)$ 求得的所有数据包的解码的概率应该相等, 即

$$(1 - \bar{P}(n-1))^{\sum_{i=1}^{n-1} k_i} = 1 - P(n-1) \quad (4.4)$$

其中等号左边表示用等效丢包概率计算所有数据包都能解码的概率, 右边表示第 $n-1$ 帧视频帧能够解码, 也即所有数据包都能解码。

这样, 我们就可以从 GOP 的第一帧开始, 通过递推求得每一视频帧的解码概率。初始值 $P(1)$ 为

$$P(1) = 1 - \sum_{i=0}^{r_1} \mathcal{F}(k_1 + r_1, i, p) \quad (4.5)$$

4.2.2 视频传输失真优化模型

一般来说, 由于视频编码过程中的帧间压缩技术, 视频帧之间互相参考, 某一视频帧的丢失会造成 GOP 中后续视频帧的失真。一个极端的例子是, 如果 GOP 中的 I 帧丢失, 则所有后续视频帧都将无法解码。在本研究的框架中, 根据推论 4.1, 只要当前帧能够解码, 则 GOP 中所有之前帧也都已经成功解码, 通过参考缓冲区更新技术, 可以保证解码过程中不存在错误传播。

我们用每一帧的 PSNR 代表当前帧丢失对整体失真的影响, 记第 n 帧的 PSNR 为 $\gamma(n)$ 。根据前述视频帧的丢包概率, 可以计算其预期失真

$$D(n) = \gamma(n)P(n) \quad (4.6)$$

对于整个 GOP, 其预期失真为所有视频帧预期失真的加和, 即

$$\overline{\mathcal{D}}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N D(n) \quad (4.7)$$

其中 \mathbf{r} 代表 GOP 中冗余信息在不同视频帧编码块之间的分配向量 (r_1, \dots, r_N) 。

4.3 问题建模和优化求解

为了提升 FEC 的冗余保护效果，我们希望找到一种能够使 GOP 整体预期失真最小的冗余分配方案。这一优化为题可以抽象为一个带约束的优化问题

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^* = & \arg \min_{\mathbf{r}} \overline{\mathcal{D}}(\mathbf{r}) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N (k_i + r_i) \leq C \\ & r_i \geq 0 \quad \forall i \in [1, N]. \end{aligned} \quad (4.8)$$

其中 C 表示传输带宽上限。约束一限制了所有源数据包和冗余数据包的数量上限，这一上限值与网络带宽以及系统设定有关。

这一带约束优化问题的目标是找到使整体预期失真最小的冗余分配方案 \mathbf{r}^* ，从而最大化 UEP 的效果。在式4.8的非线性整数优化问题中，通过穷举法得到最优解的时间复杂度为 N^R （这里 R 代表所有校验包数量的最大值），其计算量是实时系统所无法容忍的。

算法 1 式4.8的次优贪心解法

```

r, r*  $\leftarrow$   $(0, \dots, 0)$ 
 $\overline{\mathcal{D}}$   $\leftarrow$   $+\infty$ 
for  $i \leftarrow 1, R$  do
    r  $\leftarrow$  r*
    for  $j \leftarrow 1, N$  do
         $r_j \leftarrow r_j + 1$ 
         $\overline{\mathcal{D}}_t \leftarrow \overline{\mathcal{D}}(\mathbf{r})$ 
        if  $\overline{\mathcal{D}}_t < \overline{\mathcal{D}}$  then
             $\overline{\mathcal{D}} \leftarrow \overline{\mathcal{D}}_t$ 
            r*  $\leftarrow$  r
        end if
         $r_j \leftarrow r_j - 1$ 
    end for
end for
    
```

为了解决这一计算复杂度问题，我们提出了一个基于贪心算法的次优解法，见算法 1。该算法中，我们将校验包逐个分配到整个 GOP 的编码块中，对于每个校验包，

都逐一测试所有编码块，并最终确定在能使当前整体预期失真最小的编码块。这一算法的复杂度降低到 $\mathcal{O}(NR)$ ，并且实验表明，其结果与穷举整个解空间得到的结果基本相同。

4.4 实验验证

本小节，我们通过实验测试了我们提出的算法的性能，并与原始算法进行了对比。

4.4.1 实验设置

我们选择了 Foreman, Bus, Mobile 和 Stefan 四个不同风格的视频序列作为我们实验的视频源，并用 JM18 [39] 将其编码为 GOP 为 IPPP 形式、大小为 30 帧的格式。在性能测试中，我们选择了本改进算法的原始算法：RE-RS [33]，以及最原始的平均分配冗余的 FEC 编码算法。

4.4.2 结果分析

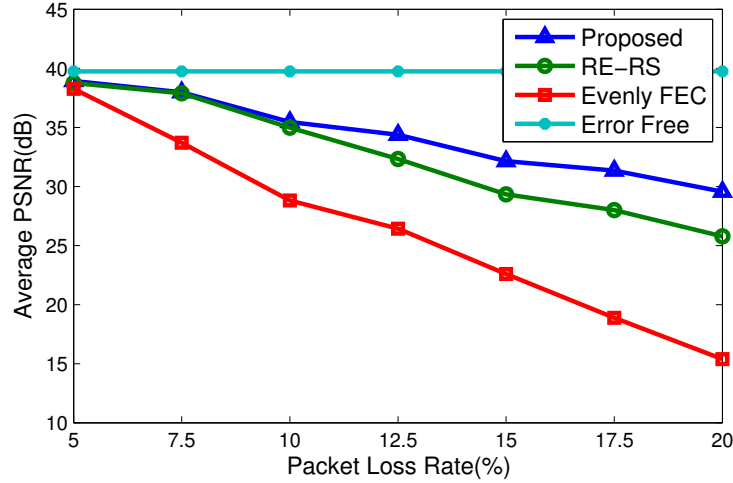


图 4.1 不同丢包率下 PSNR 表现，带宽 = 1Mbps，871 Kbps Foreman 序列

首先，我们比较了上述三种算法在不同丢包率环境下的 PSNR 表现。在本实验中，我们使用了编码码率为 871Kbps 的 Foreman 序列，网络带宽限制为 1M。实验结果如图 4.1 所示，其中无丢包情况的 PSNR 表现作为基准值标出。图中可以明显看出，我们的算法在所有丢包率情况下 PSNR 表现都高于其他算法，值得注意的是，随着丢包率的增大，这一差距也越来越明显。这一效果提升得益于我们的算法在不同丢包率场景

下，能够通过理论计算得到最优冗余分配方案，在相同冗余率下获得更好的保护效果。当丢包率达到 20% 时，我们的算法相比 RE-RS 算法获得了高达 5.0 dB 的 PSNR 增益。

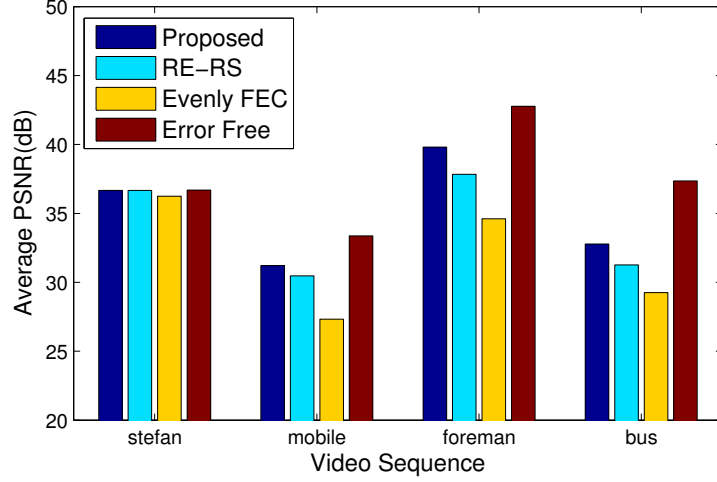


图 4.2 不同视频序列下 PSNR 表现，带宽 = 2Mbps，序列：Stefan:1441Kbps, Mobile:1786Kbps, Foreman:1812Kbps, Bus:1890Kbps

为了测试算法对不同特征视频的适应性，我们还用不同特点和码率的视频序列对三种算法的表现进行了实验。图 4.2 表明，我们的算法在不同视频序列中均表现出更好的冗余保护效果。并且随着视频码率提高（同带宽下冗余率相应降低），我们的算法由于能够更有效地利用有限的冗余数据，因而获得了更明显的效果提升。

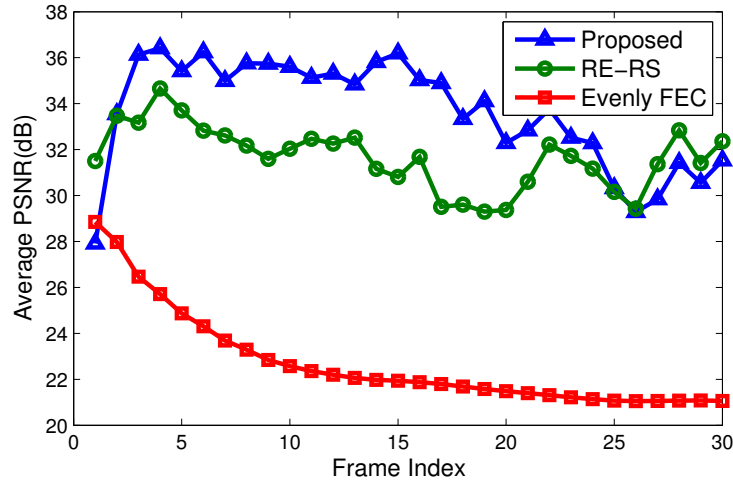


图 4.3 逐帧 PSNR 表现，丢包率 = 10%，带宽 = 1Mbps，871 Kbps Foreman 序列

最后，为了分析我们的算法在 FEC 冗余优化分配中的具体原理，我们对 Foreman 序列在 10% 丢包率，1Mbps 带宽条件下进行了测试，并绘制了三种算法在 GOP 中每一帧的 PSNR 表现，如图 4.3。在 RE-RS 和我们的算法中，由于采用了扩展窗口编码框

架，视频帧间的错误传播都得到了有效控制，因此不会出现 Evenly FEC 这种随着帧序列增大失真明显增多的现象。而我们的算法通过在不同帧之间冗余信息的优化分配，达到了整体上失真的最小化。

4.5 本章小结

本研究中，我们对一种针对实时视频传输的扩展窗口 FEC 框架进行了建模、分析，并提出了一种基于此框架的冗余分配方案。我们首先针对 EW-RS 框架进行了准确的丢包率分析，并针对其编解码特征提出了两条推论。然后我们推导出了 GOP 整体语预期失真公式，作为冗余最优化分配的理论基础。在此基础上，冗余分配问题被归纳为带约束的非线性优化问题。另外，为了简化这一问题的求解，我们设计了一种基于贪心的次优求解算法，使这一冗余分配算法能够适用于实时传输场景。大量实验结果表明，我们的算法在各种网络场景下都能明显提高视频传输的 FEC 保护效果。

第五章 面向电视盒子的实时视频通话系统

在前面两章介绍的视频码率自适应算法和非对称差错保护算法部分，我们已经在实验中取得了良好的视频传输效果。为了在更加真实的环境中验证我们的算法，并使其发挥最大的应用价值，我们基于开源视频通话软件实现了一个面向安卓电视盒子和智能手机双平台、提供高清视频通话的软件，我们将其称为 TVphone(TV based video phone)。该软件的目标是基于未来全面覆盖的家庭 Wifi 和公共 Wifi 等信道，利用具有多媒体功能，提供的大屏幕、高清晰影像的电视盒子以及随时随地进行视频通话的智能手机两种平台，提供兼顾了通话效果和便利性的高清视频服务，并克服由高清视频大数据量以及无线网络质量差等对保障视频质量造成的困难。本章主要介绍 TVphone 系统的整体设计模式、主要算法模块的实现框架和运行效果测试。

5.1 背景介绍

随着无线网络的覆盖日益广泛以及手机流量越来越廉价，人们日常生活休闲中对视频服务的需求量也越来越大，而这其中对人们生活方式改变最大的应该是通信方式从语音向信息量更丰富的视频通话转变。目前提供视频通话的应用如 FaceTime、QQ、微信视频、Skype、环聊等使用率越来越高，一系列以此为基础的多媒体软件也快速涌现。

在底层传输方面，绝大部分实时视频服务都采用了 RTP(Real-time Transport Protocol) 实时传输协议。该协议提供了在互联网上传输实时数据（音频、视频等）所需要的基本功能，如时间戳同步、数据排序等。但该协议没有提供数据保护或传输质量保障功能，因此传输中一般还使用 RTCP(Real-time Transport Control Protocol) 用于传输质量监测、反馈等功能，从而实现基本的链路控制和数据保护。RTCP 协议定时向发送方反馈当前网络的延迟、丢包率、网络抖动等网络基本信息，在发送端结合具体的码率自适应算法进行码率控制。在目前的视频通话应用中，主要使用了基于状态机的自适应算法，结合工程师的经验添加复杂的控制逻辑进行效果优化，而这一过程是没有理论分析支持的。另一方面，由于 RTP 协议不支持冗余保护，目前很多视频通话服

务都没有丢包恢复功能，更不用说对冗余分配的优化，因此在信道质量较差的网络中往往播放效果很差。这也是我们前面两章的算法以及系统实现中主要解决的问题。

在本研究中，我们希望通过重新实现视频通话系统的底层传输模块，一方面利用我们的码率自适应算法，实现视频通话过程中的延迟可控，并通过理论分析有针对性地提升码率调整的效果；另一方面，增加一个独立的 FEC 冗余保护模块，并结合冗余分配优化方案，在高丢包网络下保证稳定的视频质量。考虑到实时视频传输过程中涉及到的视频采集、编解码、播放以及传输过程中的连接建立、维护等功能实现起来都十分复杂并且已经有成熟的实现，而且这部分也不是本研究中关注的重点，因此我们选择了比较成熟的开源视频通话软件 Linphone [13] 作为算法模块实现的基础。

5.1.1 Linphone 项目框架

Linphone 是一个开源视频通话软件，平台支持非常全面，包括 Windows、MAC OSX、Linux、Android、iOS 等。其核心模块为 Liblinphone 库，实现了除用户界面以外的所有 Linphone 功能，并且提供了丰富的用户接口，如音频、视频通话的发起、结束、设置等。Liblinphone 库包含了三个功能模块，分别是：

Mediastreamer2 流媒体处理，包括音、视频的采集、编解码等功能

oRTP 负责流媒体传输，RTP 和 RTCP 协议的具体实现

belle-sip 提供 SIP 协议支持的库

以上所有 Liblinphone 的内容都采用纯 C 代码实现。在 TVphone 的开发中，我们主要关注包含视频处理的 Mediastreamer2 模块和负责视频传输的 oRTP 模块。

Liblinphone 采用了模块化的设计模式，每一个功能模块实现为一个 Filter 数据结构，完成一项具体操作（视频采集、编码、封装等）。每个 Filter 都实现了统一的输入和输出接口，利用函数指针将需要的 Filter 组合起来即可完成整个服务过程，其基本框架如图5.1所示。在发送端，MSCapture 完成视频数据的采集，原始视频数据进入 MSEncoder 进行压缩编码，编码后的数据在 MSRtpSend 完成 RTP 协议封装并通过网络链接向接收端发送。接收端 MSRtpRecv 接收到网络数据，对 RTP 数据包进行拆包得到视频数据，经过 MSDecoder 解码即可通过 MSOutput 播放视频画面。另外 VideoStreamer 是一个单独启动的 Filter，完成网络信息的收集和反馈并以此为基础进行

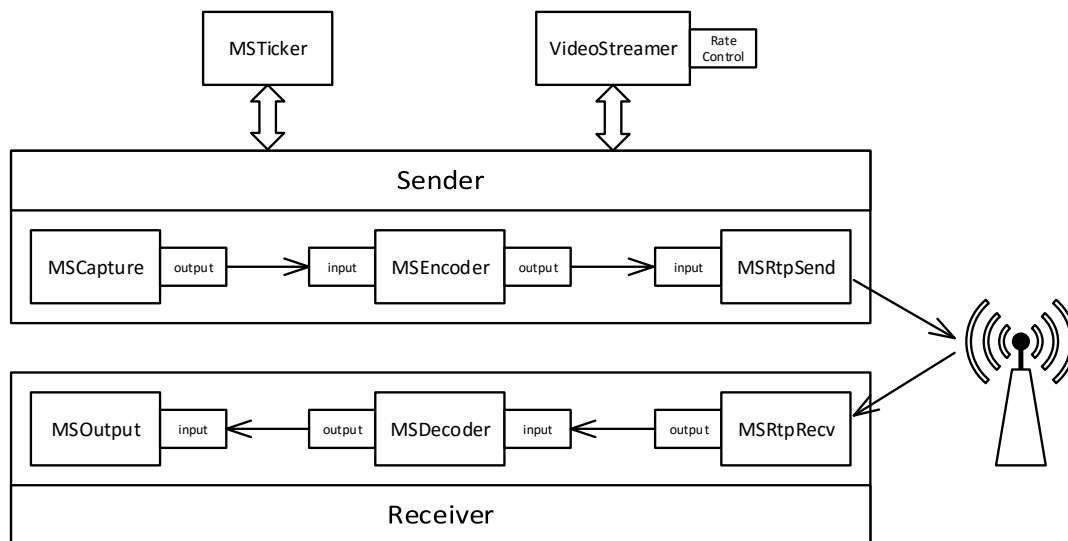


图 5.1 Liblinphone 系统框架

码率控制。注意到图中 VideoStreamer 附带的码率控制 (Rate Control) 模块是 Linphone 已经实现的码率控制协议，实现了一套较复杂的基于状态机的码率控制，但在后续实验中可以看到，其表现尚有较大提升空间。另外，上述过程通过在独立线程中启动的 MSTicker 进行调度。以上所有 Filter 都只定义了输入和输出信息的格式，因此可以根据需要随意替换其具体实现，如 MSEncoder 可以实现为 VP8 或 H.264 等不同的视频编码格式。

5.1.2 RTP 与 RTCP 传输协议

RTP（实时传输协议），顾名思义就是用来传输实时数据的，它作为因特网标准在 RFC 3550 [3] 中有详细说明。它为实时音、视频传输提供实时的传输服务，其中包括载荷类型标记、序列编号、时间戳和送达检测等。接收端可以利用 RTP 包头中的序列号和时间戳进行数据包的重排序和丢包检测。大部分应用将 RTP 建立在 UDP 协议之上，以利用其数据包校验、多地址发送等特性。需要注意的是，RTP 本身并不提供任何机制保障数据包按时到达或其他传输质量保证，数据包可能发生丢包或乱序到达。

RTCP 为 RTP 数据流提供信道外控制。RTCP 本身并不传输数据，而是定期在会话参加者之间传输控制数据。RTCP 的主要功能是为 RTP 所提供的服务质量提供反馈。RTCP 收集相关媒体连接的统计信息，如传输字节数，传输分组数，丢失分组数，jitter，单向和双向网络延迟等等，网络应用程序即可利用 RTCP 的统计信息来控制传输的品质，比如当网络带宽高负载时限制信息流量或改用压缩比较小的编解码器设置。

Linphone 中的 oRTP 模块就是对上述 RTP 和 RTCP 协议的封装，并实现了数据包的丢包检测，重排序等功能。我们的码率自适应算法也主要使用了 RTCP 协议所携带的网络信息进行码率控制。

5.2 系统设计

5.2.1 设计框架

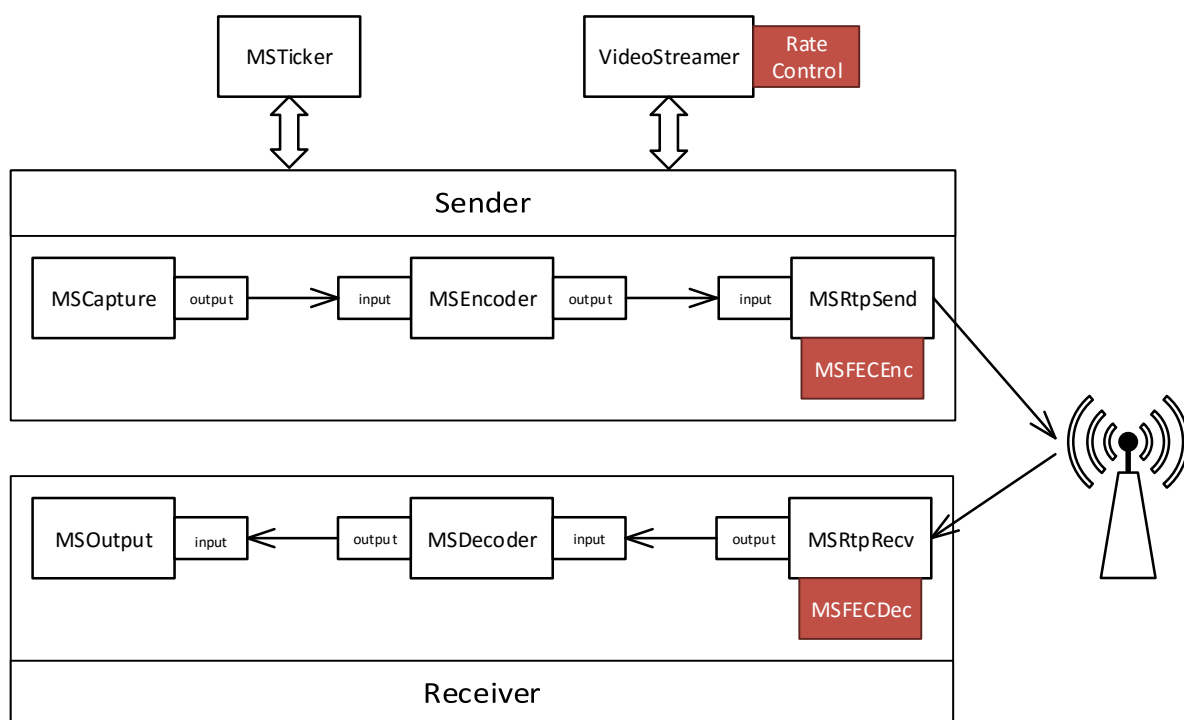


图 5.2 Liblinphone 改进系统框架

如上所述，在 TVphone 系统中，我们希望集中于码率自适应和差错保护两个模块的实现和优化，对于视频采集播放、编解码、RTP 封装等操作直接沿用 Linphone 中的代码。基于上述 Filter 设计模式，我们设计出如图5.2所示的改进系统框架。

一方面，我们沿用 Linphone 原有的码率控制框架，进行一些必要的改进之后植入了我们的码率自适应模块。我们在接收端通过一个网络探测模块获取网络状况信息并输入码率自适应模块，该模块输出相应的最优视频码率并通过 RTCP 协议发送给发送端，在发送端调用底层视频编码器接口改变输出视频的码率。

另一方面，根据原始 LibLinphone 的 MSRtpSend 和 MSRtpRecv 模块设计，底层进行 RTP 包封装后直接发送数据到 UDP 网络层。为了实现冗余保护功能，我们在

MSRtpSend 的输出端和网络链路之间增加了一个 FEC 冗余编码模块 MSFECEnc, 以及在 MSRtpRecv 处理网络数据包之前增加了一个 FEC 解码模块 MSFECDec, 这两个模块分别作为 RTP 模块的附属功能单元进行 FEC 编解码操作。这样, 所有发送到网络的 RTP 数据包都添加了 FEC 冗余数据, 只要丢包数量低于 FEC 解码的阈值, 即可避免视频失真。

5.2.2 码率自适应模块

码率自适应是实时视频传输过程中最核心的控制模块, 保证了视频通话服务在任何网络下都能顺利进行并获得相对较好的效果。我们设计的 TVphone 码率自适应模块主要采用了第3章提出的延迟优化的实时视频码率自适应算法, 针对实时视频的需求以排队延迟为输入, 以低延迟和稳定高效的带宽利用为目标进行视频码率控制。

5.2.2.1 上层接口描述

```
int rc_process_rtcp (MSQosAnalyzer *objbase , mblk_t *rtcp);
```

码率自适应模块对上层提供的接口只有一个函数 rc_process_rtcp, 该函数以 RTCP 包为输入, 完成网络状态信息收集、码率计算、定时反馈等任务。其输入 objbase 指向码率自适应模块的内存实体, 记录码率自适应算法的设置、历史信息等; rtcp 指向接收到的 RTCP 包。输出为代表函数执行状态的整数代码。函数在系统收到携带网络状态信息的 RTCP 包时被调用。

5.2.2.2 模块介绍

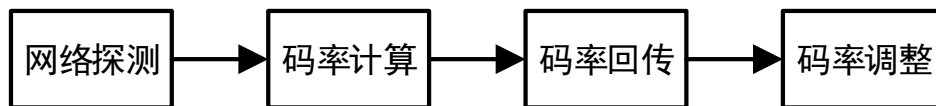


图 5.3 码率自适应模块设计框架

如图5.3所示, 码率自适应模块的主要功能单元包括网络探测、码率计算、码率回传和码率调整四部分。

“网络探测”单元为码率自适应算法提供必要的网络运行状态参数, 在我们的算法中主要用到排队延迟。在第3.5.1节中, 我们已经给出了利用单向延迟计算排队延迟的方法, 因此网络探测模块需要提供单向延迟的探测。为了探测网络的延迟, 发送端每

隔 100ms 发送一个 RTCP 探测包并标记发送时刻的时间戳，接收端收到该 RTCP 包即可利用发送和接收的时间差计算单向延迟、最小单向延迟，进而根据式 3.21 计算排队延迟。另外，网络探测模块还根据收到 RTP 包的序列号统计网络丢包率，以供极端情况下的码率调整和差错保护。

“码率计算”单元是运行在视频接收端的功能单元，其根据网络探测输入的延迟和丢包率信息，套用第 3 章算法计算目标码率并提交给“码率回传”单元反馈给发送端。将码率计算单元设置在接收端主要有两点考虑：

- (1) 视频传输过程中，排队延迟、丢包率等网络参数的统计都在接收端完成，回传目标视频码率的通信量明显低于回传全部网络参数所需要的通信量。
- (2) 系统运行过程中，接收端网络参数的采集频率可以很高。码率计算在接收端进行，更频繁地计算目标码率值，并根据这一值的变化情况动态地选择更加合理的回传频率，以优化系统反应速度和带宽占用。

视频码率的调整速率对视频通话系统的很多方面都有影响。如果码率调整间隔太大，会造成网络拥塞状况得不到及时解决，出现较大的延迟波动；单次调整变化过大，对用户体验造成一定影响。而如果码率调整太频繁，会造成视频编码器负载增大；回传次数增多，网络负载增加等问题。通过实验测试，我们选择了 500ms 作为码率回传单元回传码率的默认时间间隔。另外如果两次计算的目标码率变化超过一定阈值，则会立刻发送该目标码率以避免网络拥塞。

码率调整单元直接调用视频编码器 Filter 提供的接口进行设置，由具体的 VP8、H.264 等编码器实现视频输出码率的控制。需要注意的是，大部分视频编码器并不能完全将输出码率固定在一个准确的值，而是会在一定范围内波动并尽量使平均码率接近目标值。这一点也给实时视频的码率自适应策略带来一定的困难。

5.2.3 差错保护模块

差错保护是视频通话系统的可选模块，以增加带宽占用为代价提供一定的丢包恢复能力。在无线网络场景下，现有技术已经实现了非常高的峰值带宽，然而由于传输信道的局限，仍然存在一定的丢包情况。因此无线网络下应用差错保护成为一种性价比很高的提升视频通话效果的方案。基于无线网络通信的需求，我们在 TVphone 系统

中添加了一个独立的差错保护模块，并用第4章提出的非对称差错保护算法对保护效果进行了优化。该差错保护模块的设计框架如图5.4所示。

5.2.3.1 上层接口描述

差错保护模块提供与 FEC 编解码相关的接口供 oRTP 模块调用，其主要接口如下：

```
int fec_set_rate(MSFecDriver *obj, int block_size, int
    fec_rate);

int fec_outgoing_rtp(MSFecDriver *obj, mblk_t *rtp);
int fec_incoming_rtp(MSFecDriver *obj, mblk_t *rtp);
int fec_incoming_rtcp(MSFecDriver *obj, mblk_t *rtcp);
```

其中 `fec_set_rate` 可以动态调整差错保护的冗余率，在系统初始化时调用，也可以在系统运行中根据网络状态调用该函数修改冗余率。当发送端 `MSRtpSend` 模块准备发送 RTP 包时，首先调用 `fec_outgoing_rtp` 对 RTP 包进行缓存、FEC 编码并发送 FEC 数据包（通过 RTCP 协议封装）。当接收端 `MSRtpRecv` 模块收到 RTP 包或携带冗余数据的 RTCP 数据包时，分别调用 `fec_incoming_rtp` 和 `fec_incoming_rtcp` 进行数据缓存、FEC 解码并恢复丢失的 RTP 数据包。

5.2.3.2 模块介绍

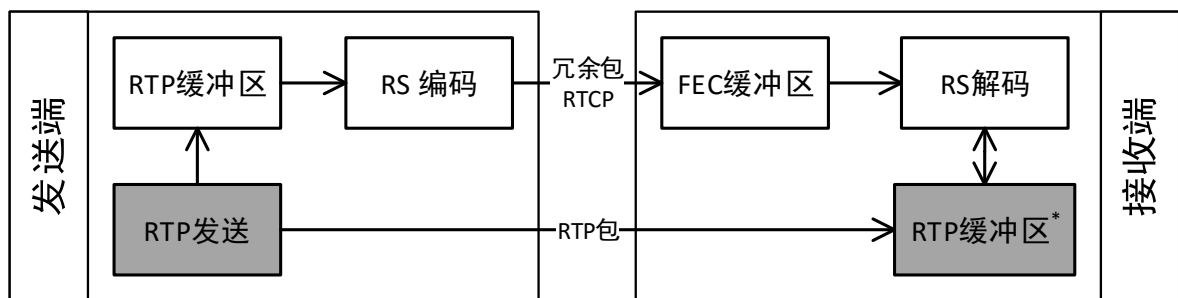


图 5.4 差错保护模块设计框架

图5.4中灰色单元为 Liblinphone 中的原生功能单元^①，均实现于 oRTP 中，完成 RTP 协议的部分功能。具体来说，底层视频编码器产生的数据经过 oRTP 的封装形成 RTP 包，通过“RTP 发送”单元经 UDP 等网络层到达接收端。在负责接收的 oRTP 部分维护

① 其中接收端“RTP 缓冲区”单元进行了一些修改以适应扩展窗口编码要求

了一个“RTP 缓冲区”，用于缓存还未用于视频解码的 RTP 包，并根据时间戳对 RTP 包进行排序。当然由于实时视频传输的播放延迟非常小，因此这个 RTP 缓冲区内通常只缓存了很少的数据包。

根据第4章的描述，我们在差错保护模块采用了比较成熟的 Reed-Solomon 编码 (RS 编码)，并使用了 Github 上的一个实现了 Reed-Solomon 编码的开源库 longhair [34] 作为底层编码单元。RS 编码具有 $RS(N, K)$ 编码格式，即每个编码块对 K 个 RTP 包进行冗余编码生成 $N - K$ 个 FEC 校验包，在接收端只要接收到该编码块中的任意 K 个包，就能通过对编码块的解码完全恢复丢失的 RTP 包。因此在我们的差错保护模块中，发送端需要对待编码的编码块中的 RTP 包进行缓存，接收端则需要对接收到的 RTP 包和校验包进行缓存以备解码。因此在差错保护模块中包含了发送端和接收端的“RTP 缓冲区”以及接收端的“FEC 缓冲区”共三个缓冲区，而其中接收端的“RTP 缓冲区”沿用了 oRTP 模块中的实现。

发送端的“RS 编码”和接收端的“RS 解码”单元分别完成 RS 编码和解码过程。其中 RS 编码的输入为 RTP 缓冲区中的 RTP 包，编码结束后得到的冗余包经过 RTCP 协议发送到接收端。接收端以“RTP 缓冲区”中的 RTP 包和“FEC 缓冲区”中的校验包为输入，如果发现丢包并且满足 $RS(N, K)$ 的解码条件，则进行解码恢复丢失的 RTP 包。这些恢复的 RTP 包也被放入“RTP 缓冲区”等待下一步的视频解码。在 RS 编码过程中，还涉及到编码块的组织、冗余分配优化、编解码效果优化等实现细节，将在下节详细说明。

5.2.3.3 扩展窗口 RS 编解码实现

由于我们的差错保护模块采用了基于扩展窗口的 RS 编码框架，在发送端 RTP 缓冲区的使用上与传统 FEC 编码过程有一定差别，编码过程也需要进行修改，发送端编码的流程图如图 5.5 所示。当新的 RTP 包产生并发送到网络的同时，它的一份拷贝进入发送端的“RTP 缓冲区”并触发 RS 编码模块的处理流程。首先 RS 编码器检查当前 RTP 包的时间戳与上一个 RTP 包是否发生变化。如果时间戳没有变化，说明他们属于同一视频帧，由于我们的编解码过程都以视频帧为边界（否则，若同一视频帧的数据包被分割在不同编码块，将会引入额外播放延迟），可以直接将当前 RTP 包加入 RTP 缓冲区。如果时间戳发生了变化，说明上一个视频帧的所有 RTP 包均已缓存，这时 RS

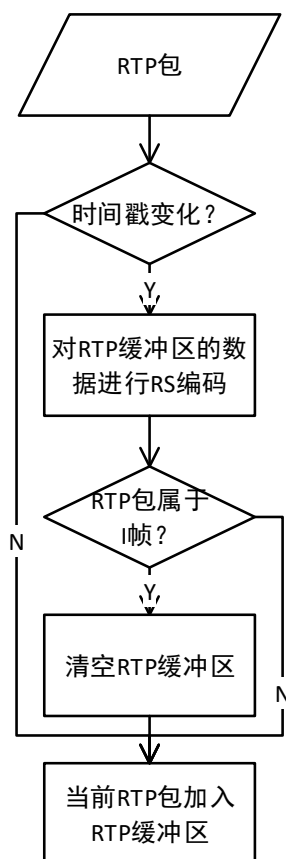


图 5.5 扩展窗口 RS 编码流程图

编码器以 FEC 缓冲区内的所有数据包为编码块进行 RS 编码，并发送生成的校验包。另外，如果当前 RTP 包属于 I 帧，说明我们已经处理完了一个 GOP，需要重新开始扩展窗口过程，此时清空当前缓冲区。无论是否清空缓冲区，都需要将当前 RTP 包加入 RTP 缓冲区以备下一轮编码。

在接收端，oRTP 模块根据当前视频播放时间戳从 RTP 缓冲区中取出时间戳小于播放时间戳的所有 RTP 包，输出到后续视频解码模块进行解码和播放。为了方便描述，我们在图5.6中给出了某一播放状态下的 RTP 缓冲区和 FEC 缓冲区状态，以及播放时间戳位置。如图所示，接收端的两个缓冲区中保存了当前待播放视频帧所在 GOP 的所有视频帧的数据包（图中 1/5 为 I 帧），及其之后的所有数据包。当播放时间戳到达第 3 帧并试图取 RTP 包时，首先对 1-3 帧组成的编码块进行解码，此时第 2 帧中丢失的 RTP 包可以被恢复，并将第 2 帧的解码图像在解码器的参考缓冲区中更新，此时 RS 解码过程结束。值得注意的是，如果没有扩展窗口编码框架对第 2 帧的恢复，则当前 GOP 中的 2-4 帧都将无法解码，而通过这一框架使得 3/4 帧都得以解码播放。

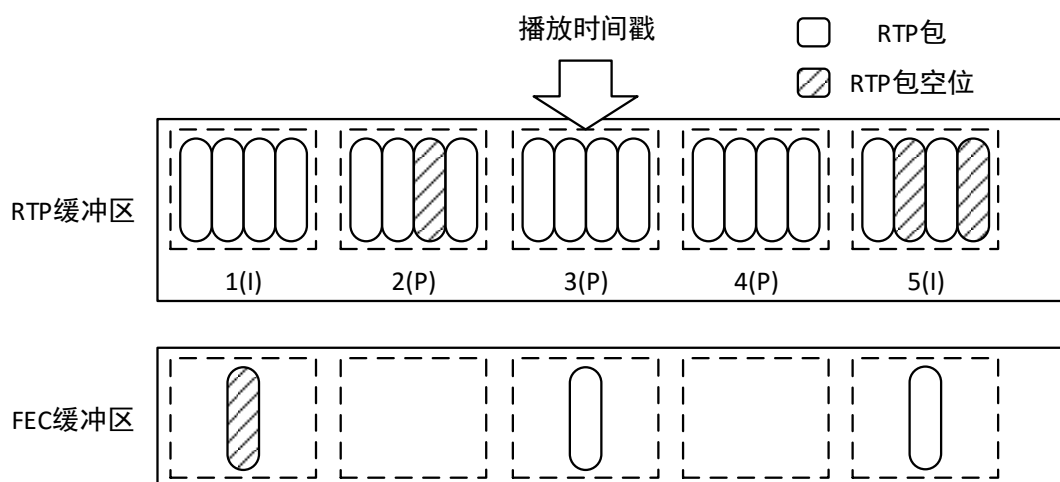


图 5.6 扩展窗口 RS 编码流程图

5.2.3.4 冗余率和冗余分配优化

如果系统冗余率明显超出了纠正丢包所需的比例，会有大量冗余包得不到利用而造成网络带宽的浪费；而如果冗余率过低，又会造成大量丢包无法恢复，通话质量得不到保证。为了尽可能使冗余率适应网络需求，我们增加了一个简单的冗余率自适应功能。即如果网络丢包率连续三次高于 5% 则提高一档冗余率，如果网络丢包率连续三次低于 1% 则降低一档冗余率。经测试这一简单策略可以较好地实现网络变化时的冗余率自适应。

针对第4章中提出的冗余分配优化算法，我们需要根据当前网络的丢包率以及当前视频 GOP 中不同位置视频帧的特性计算合理的冗余分配方案。如果对于每个 GOP 都重新计算，将会严重增加客户端的计算负载，并且实时性也无法得到满足。因此我们每隔 1 分钟采样一次当前平均丢包率和 GOP 的视频帧特性，通过算法1计算最优冗余分配，并在下一次采样计算前的所有 RS 编码中使用这一分配策略。

5.2.4 面向电视盒子的界面优化

基于上述对视频通话服务核心模块的增改，为了能够进一步体现高质量视频传输的效果并更好地服务于视频通话的需求，我们为 TVphone 设计了一套面向电视盒子的交互界面。通过这一界面，用户可以使用遥控器进行操作，直接在电视屏幕上实现视频通话，获得更好的用户体验。本章简要介绍其中几个主要界面的设计和实现。

本 TVphone 视频通话系统的主要页面跳转逻辑如图5.7所示。应用启动后，首先出

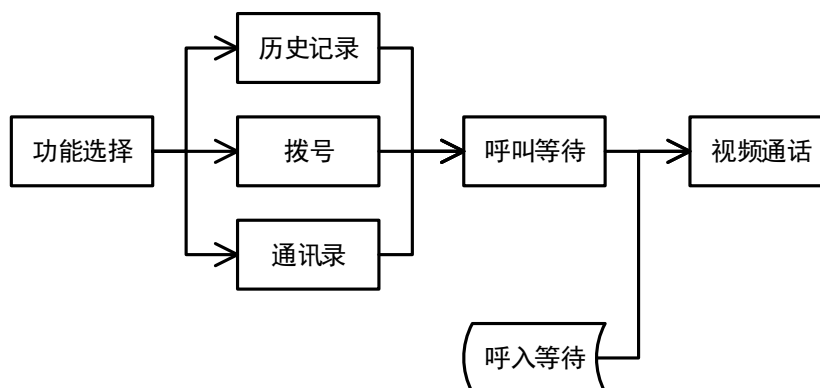


图 5.7 页面跳转逻辑

现功能选择界面5.8，用户可以选择的功能包括：历史记录界面查看最近的联系人并可以直接拨号；拨号界面5.9通过输入对方的联系方式发起呼叫；通讯录界面5.10则记录了用户主动保存的联系人。在上述三个界面均可以方便地发起视频通话请求，进入呼叫等待界面等待对方接通。同时，软件在后台对呼入请求进行监听，发现呼入请求后转到呼入等待界面5.11。当通话双方均做好准备后，就可以打开视频通话界面开始高清视频通话。

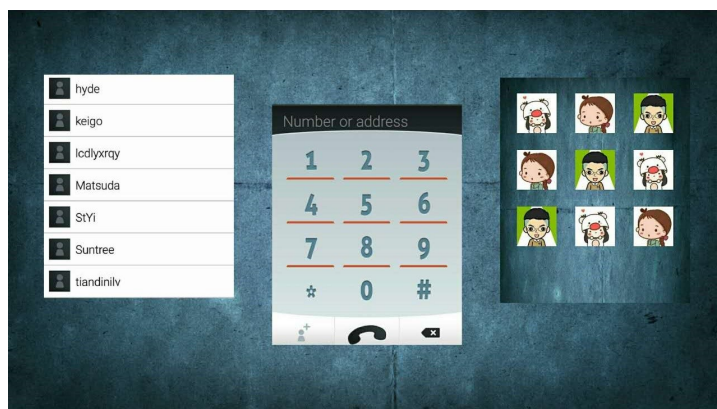


图 5.8 功能选择界面

5.3 实验验证

TVphone 的目标是在无线网络环境下，提供面向手机和电视的高清视频通话服务。为了验证其服务效果，我们在手机和电视盒子上安装了 TVphone 应用，并在真是无线网络环境下进行了测试。为了得到更全面的实验数据，我们还利用模拟器对不同网络状况进行了模拟，并对通话过程中的日志、视频文件进行记录和分析。

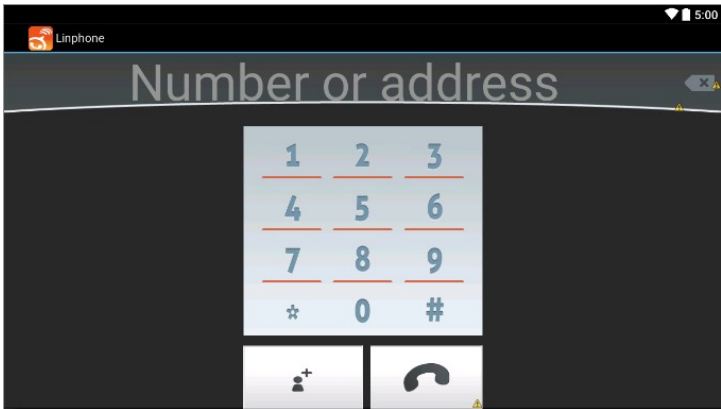


图 5.9 拨号界面

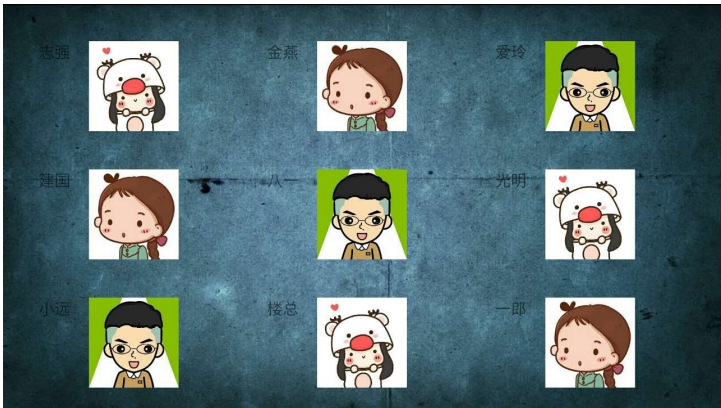


图 5.10 通讯录界面

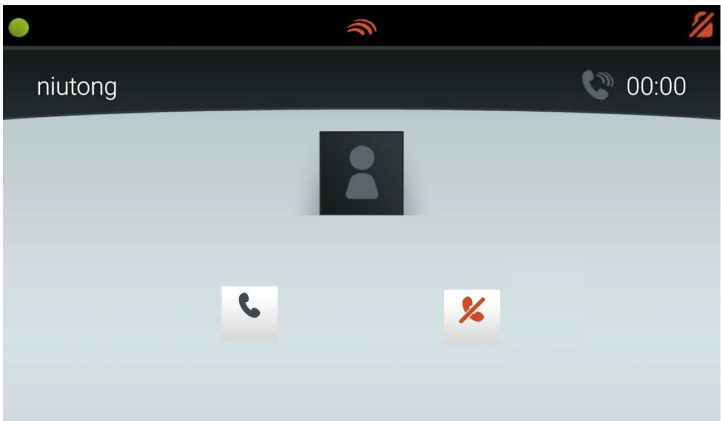


图 5.11 呼叫等待界面

5.3.1 实验设置

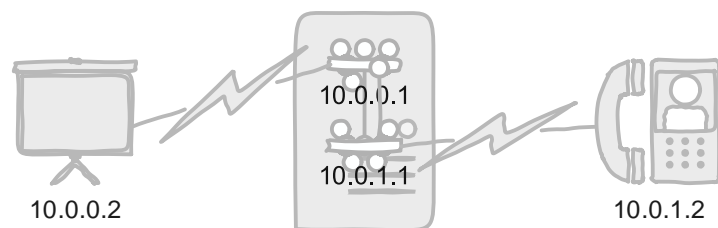


图 5.12 差错保护模块设计框架

基本测试平台如图5.12所示。为了对网络流量进行控制并检测网络利用情况，我们用一台具有双无线网卡的 PC 作为网络基站，建立两个处于不同网段（10.0.0.X 和 10.0.1.X）的无线网络。视频通话终端是安装了 TVphone 应用的手机和连接了电视盒子的电视，并分别连接两个无线网络。由于手机和电视处于不同网段，所有通信必须通过 PC 基站进行中转，我们就可以在 PC 基站上使用流量控制软件进行不同网络状况的模拟，如丢包、延迟等。

5.3.2 结果分析

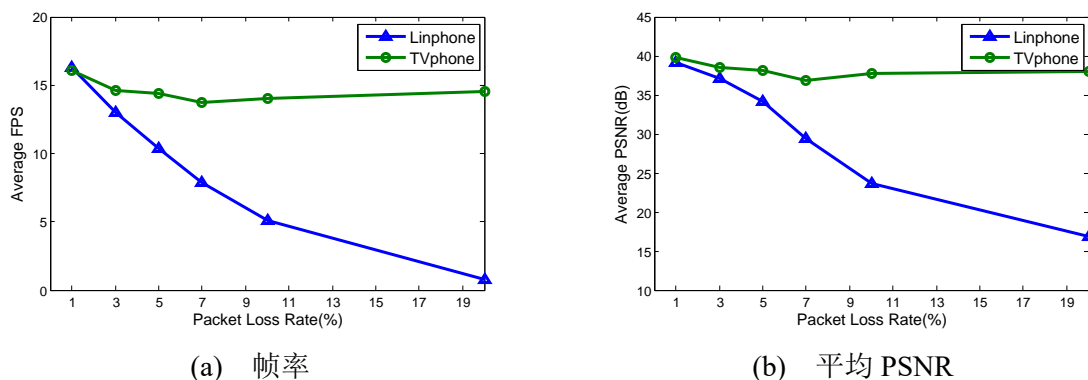


图 5.13 不同丢包率下系统表现

我们首先在不限带宽的情况下，通过模拟不同的网络丢包率测试原始 Linphone 和 TVphone 对丢包的容错能力。在测试指标中，帧率（frame per second）体现了系统成功解码视频帧的能力，而平均 PSNR 则更精确地分析了视频画面的效果。从图 5.13 可以看出，由于增加了差错保护模块，我们的算法在有丢包情况下，也基本完全恢复了所有数据包，通话质量没有明显变化。而 Linphone 由于在丢包情况下大量视频帧无法解码，因而帧率随丢包率升高逐渐降低。同时由于帧率降低以及解码过程中由于丢包引入的画面失真，使得整体的 PSNR 都下降明显。图 5.14 截取了两个系统运行中的



图 5.14 视频播放效果对比

画面，从中可以看到，左侧的 Linphone 通话画面画质较差，而且存在丢包造成的马赛克，与 TVphone 形成鲜明对比。

5.4 本章小结

为了使我们在前两章中提出的算法能够更好地服务于现实，落实到实际应用中，我们基于真实平台实现了这些算法。为此，我们调研了一个开源视频通话软件，对其整体架构、各部分模块的具体实现、底层算法都进行了总结和梳理。以此为基础，我们将新的算法实现为独立模块植入原有系统中，解决了一系列代码实现和软件兼容问题，成功升级了该视频通话软件的内核，提高了其视频传输的质量。为了拓展高清视频通话的应用场景，我们还重新设计的该系统的用户界面，将其移植到大屏幕的电视盒子上，创造了一种新的高清视频通话体验。实验表明，我们的应用明显提升了视频通话的质量。

第六章 总结与展望

6.1 本文工作总结

科技的进步不断改变人们的生活方式，给人们的生活带来便利，视频通话的兴起和发展就是一个很好的例证。当然任何技术的进步都离不开学术界和工业界的共同努力，视频通信服务的发展也并非一帆风顺。实时视频对丢包和延迟高度敏感以及要求较大且稳定的带宽，与无线网络质量多变、不可靠的传输环境相矛盾，给高质量的实时视频传输服务带来很大挑战。为了在无线网络下进行高质量的视频通话，可以从拥塞控制和差错控制两方面进行优化。针对动态的网络带宽，及时地调整传输视频的码率可以避免网络拥塞并最大化带宽利用率。另一方面，针对无线网络易丢包的特点以及实时视频对延迟的需求，采用 FEC 编码可以为视频流提供一定的抗丢包能力，获得更好的视频体验。本文针对上述两个方面分别进行了研究，我们的创新点主要包括以下方面：

- (1) 针对无线网络中的实时视频传输，我们提出了一个分布式、延迟可控的码率自适应算法，满足了视频传输中的低延迟、带宽稳定、高带宽利用率等需求。我们首先通过对网络建模分析，提出了简化网络链路的排队延迟模型，并引入了影子价格和失真权重参数来更好地实现拥塞控制和多流公平。通过建立闭环反馈控制模型，并引入比例控制器进行参数优化，使得控制过程更加高效、平滑。另外，我们实现了一套完整的算法测试平台，并对算法进行了系统实现和大量效果测试。实验表明，相比于其他主流码率自适应算法，我们的算法在带宽利用率、稳定性，视频质量等方面都有更好的表现。
- (2) 我们对一种针对实时视频传输的扩展窗口 FEC 框架进行了建模、分析，并提出了一种基于此框架的冗余分配方案。我们首先针对 EW-RS 框架进行了准确的丢包率分析，并针对其编解码特征提出了两条推论。然后我们推导出了 GOP 整体语预期失真公式，作为冗余最优化分配的理论基础。在此基础上，冗余分配问题被归纳为带约束的非线性优化问题。另外，为了简化这一问题的求解，我们设计了一种基于贪心的次优求解算法，使这一冗余分配算法能够适用于实时传输场景。

大量实验结果表明，我们的算法在各种网络场景下都能明显提高视频传输的 FEC 保护效果。

- (3) 利用本文中算法方面的工作，我们基于开源软件对齐内核进行了重写，实现了新的码率自适应和差错保护模块，实验表明这一新的底层模块大大改进了原软件的视频通话体验。为了充分发挥高质量视频传输的功能，我们还对其界面进行了优化，将其移至到电视盒子上，从而实现手机、电视双平台的高清视频通话。

6.2 未来工作展望

在下一步的工作中，我们将继续深入实时视频传输过程中的拥塞控制和差错保护优化。尽管本文提出的算法已经在一定程度上改善了无线网络上实时视频传输的效果，但还远远无法满足日益增长的高清视频需求和日益多样化的网络环境。未来的工作可以从以下不同方面展开：

- (1) 视频码率自适应算法可以参考的网络参数包括丢包率、延迟、抖动等，多数算法都只针对其中一个或几个方面进行了优化，却很难兼顾这些参数之间的关系及其对视频质量的系统性影响。如何更好地综合各种网络参数，对网络状态进行估计进而控制视频码率，是下一步可以优化的问题之一。
- (2) 视频马赛克、丢帧以及通话延迟等是公认影响视频通话用户体验的因素，然而还没有客观的标准定量地评价这些指标对用户体验的影响。这一方面给传输优化算法的比较带来困难，另一方面也不利于视频传输的进一步优化。因此在视频体验的定量评价方面也可以进行一些实验和研究。
- (3) 在智能手机上进行 FEC 编解码会对其计算资源带来比较大的负载，引起发热、性能下降等问题。因此针对低性能的移动设备进行 FEC 编解码优化也是进一步提高实时视频通话体验的一种方法。

参考文献

- [1] C. V. N. Index, Global mobile data traffic forecast update, 2010-2015, White Paper, February (2016).
- [2] D. Wu, Y. T. Hou and Y.-Q. Zhang, Transporting real-time video over the Internet: Challenges and approaches, *Proceedings of the IEEE* 88 (12), 1855–1877 (2000).
- [3] V. Jacobson, R. Frederick, S. Casner and H. Schulzrinne, RTP: A transport protocol for real-time applications (2003).
- [4] V. Jacobson, Congestion avoidance and control, in *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 18, ACM (1988), vol. 18, pp. 314–329.
- [5] D. Wu, Y. T. Hou, W. Zhu, H.-J. Lee, T. Chiang, Y.-Q. Zhang and H. J. Chao, On end-to-end architecture for transporting MPEG-4 video over the Internet, *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on* 10 (6), 923–941 (2000).
- [6] T. Turlitti and C. Huitema, Videoconferencing on the Internet, *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 4 (3), 340–351 (1996).
- [7] S. Floyd and K. Fall, Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet, *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)* 7 (4), 458–472 (1999).
- [8] M. Handley, S. Floyd, J. Padhye and J. Widmer, TCP friendly rate control (TFRC): Protocol specification (2003).
- [9] L. S. Brakmo and L. L. Peterson, TCP Vegas: End to end congestion avoidance on a global Internet, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 13 (8), 1465–1480 (1995).
- [10] A. Kuzmanovic and E. W. Knightly, TCP-LP: A distributed algorithm for low priority data transfer, in *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 3, IEEE (2003), vol. 3, pp. 1691–1701.
- [11] S. Shalunov, G. Hazel, J. Iyengar and M. Kuehlewind, Low extra delay background transport (LED-BAT), *Tech. rep.* (2012).
- [12] L. De Cicco, G. Carlucci and S. Mascolo, Experimental investigation of the google congestion control for real-time flows, in *Proceedings of the 2013 ACM SIGCOMM workshop on Future human-centric multimedia networking*, ACM (2013), pp. 21–26.
- [13] [Online], <http://www.linphone.org/> (2014).
- [14] [Online], <https://datatracker.ietf.org/group/rmcat/> (2016).
- [15] T. Stockhammer, M. M. Hannuksela and T. Wiegand, H. 264/AVC in wireless environments, *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on* 13 (7), 657–673 (2003).

- [16] 陈敏, 网络实时视频传输研究, Ph.D. thesis, 华南理工大学 (2004).
- [17] Y. Wang and Q.-F. Zhu, Error control and concealment for video communication: A review, *Proceedings of the IEEE* 86 (5), 974–997 (1998).
- [18] Y. Wang, S. Wenger, J. Wen and A. K. Katsaggelos, Error resilient video coding techniques, *Signal Processing Magazine, IEEE* 17 (4), 61–82 (2000).
- [19] S. Soltani, K. Misra and H. Radha, Delay constraint error control protocol for real-time video communication, *Multimedia, IEEE Transactions on* 11 (4), 742–751 (2009).
- [20] M. Schier and M. Welzl, Optimizing selective ARQ for H. 264 live streaming: A novel method for predicting loss-impact in real time, *Multimedia, IEEE Transactions on* 14 (2), 415–430 (2012).
- [21] A. Nafaa, T. Taleb and L. Murphy, Forward error correction strategies for media streaming over wireless networks, *Communications Magazine, IEEE* 46 (1), 72–79 (2008).
- [22] G. M. Davis, J. M. Danskin and X. Song, Joint source and channel coding for Internet image transmission, in *Image Processing, 1996. Proceedings., International Conference on*, vol. 1, IEEE (1996), vol. 1, pp. 21–24.
- [23] T. Richardson, Error floors of LDPC codes, in *Proceedings of the annual Allerton conference on communication control and computing*, vol. 41, The University; 1998 (2003), vol. 41, pp. 1426–1435.
- [24] S. B. Wicker and V. K. Bhargava, Reed-Solomon codes and their applications, John Wiley & Sons (1999).
- [25] X. Yang, C. Zhu, Z. G. Li, X. Lin and N. Ling, An unequal packet loss resilience scheme for video over the Internet, *Multimedia, IEEE Transactions on* 7 (4), 753–765 (2005).
- [26] Y. Zhang, S. Qin and Z. He, Transmission distortion-optimized unequal loss protection for video transmission over packet erasure channels, in *Multimedia and Expo (ICME), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE (2011), pp. 1–6.
- [27] X. Zhang, C. Zhou and Z. Guo, A novel JSCC scheme for scalable video transmission over MIMO systems, in *Image Processing (ICIP), 2012 19th IEEE International Conference on*, IEEE (2012), pp. 2277–2280.
- [28] C. Zhou, C.-W. Lin, X. Zhang and Z. Guo, A Novel JSCC Scheme for UEP-Based Scalable Video Transmission over MIMO Systems, *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on* (2014).
- [29] D. Sejdinovic, D. Vukobratovic, A. Doufexi, V. Senk and R. J. Piechocki, Expanding window fountain codes for unequal error protection, *Communications, IEEE Transactions on* 57 (9), 2510–2516 (2009).
- [30] S. Nazir, V. Stankovic and D. Vukobratovic, Expanding window random linear codes for data partitioned H. 264 video transmission over DVB-H network, in *Image Processing (ICIP), 2011 18th IEEE International Conference on*, IEEE (2011), pp. 2205–2208.

- [31] D. Vukobratovic, V. Stankovic, D. Sejdinovic, L. Stankovic and Z. Xiong, Scalable video multicast using expanding window fountain codes, *Multimedia, IEEE Transactions on* 11 (6), 1094–1104 (2009).
- [32] C. Hellge, D. Gomez-Barquero, T. Schierl and T. Wiegand, Layer-aware forward error correction for mobile broadcast of layered media, *Multimedia, IEEE Transactions on* 13 (3), 551–562 (2011).
- [33] J. Xiao, T. Tillo and Y. Zhao, Real-Time Video Streaming Using Randomized Expanding Reed–Solomon Code, *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on* 23 (11), 1825–1836 (2013).
- [34] [Online], <https://github.com/catid/longhair> (2014).
- [35] F. Kelly, Charging and rate control for elastic traffic, *European transactions on Telecommunications* 8 (1), 33–37 (1997).
- [36] T. Berger, Rate-Distortion Theory, *Encyclopedia of Telecommunications* (1971).
- [37] D. X. Wei, C. Jin, S. H. Low and S. Hegde, FAST TCP: motivation, architecture, algorithms, performance, *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)* 14 (6), 1246–1259 (2006).
- [38] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback control of dynamics systems*, Prentice Hall Inc (2006).
- [39] [Online], <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/> (2014).

硕士期间的研究成果

发表论文

- [1] **Geng, Y.**, Zhang, X., Zhou, C., & Guo, Z. (2015, September). Unequal error protection for real-time video streaming using expanding window reed-solomon code. In Image Processing (ICIP), 2015 IEEE International Conference on (pp. 3763-3767). IEEE.
- [2] **Yufeng Geng**, Xinggong Zhang, Tong Niu, Chao Zhou, Zongming Guo, Delay-Constrained Rate Control For Real-Time Video Streaming Over Wireless Networks, Accepted by VCIP 2015

专利申请

- [1] **耿玉峰**, 张行功, 牛童, 郭宗明. 实时视频传输的 RS 编码冗余包分配方法和发送设备, 发明专利, 专利申请号:201510170234.5
- [2] **耿玉峰**, 张行功, 郭宗明. 视频码率自适应调整方法及装置, 发明专利, 专利申请号:201510208870.2

奖励荣誉

- 2014 年 腾讯创新奖学金
- 2015 年 优秀科研奖, 国瑞奖学金

致谢

三年时间转瞬即逝，研究生生活即将画上句号。衷心感谢我的导师郭宗明老师，自我进入实验室以来，在各种重要节点对我的关心、指导和嘱托，使我在学习、生活各方面都能感受到来自老师的支持。感谢指导老师张行功老师对我的悉心指导，使我在实验室的学习、研究不再迷茫，也学到了很多知识。感谢周超师兄为我树立的榜样以及对我毫无保留的帮助，使我更从容地应对各种困难。感谢同实验室的刘家瑛老师和孙俊老师的关心和指导。感谢实验室的师兄同学、师弟师妹，互相鼓励帮助，使实验室氛围更加轻松和温馨。最后，感谢计算机科学技术研究所为我提供了良好的研究学习环境。

北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

(必须装订在提交学校图书馆的印刷本)

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
- 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
- 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校 ☐ 一年 / ☐ 两年 / ☐ 三年以后，在校园网上全文发布。

(保密论文在解密后遵守此规定)

论文作者签名： 导师签名：

日期： 年 月 日