



清华大学

# 综合论文训练

## 跨国公网链路传输优化方法研究

系 别： 电子工程系

专 业： 电子信息科学与技术

姓 名： 高 艺 轩

指导教师： 王 博 副教授

二〇二六年五月



## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用综合论文训练论文的规定，即：学校有权保留论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

作者签名：

导师签名：

日 期：

日 期：



## 摘 要

论文的摘要是对论文研究内容和成果的高度概括。摘要应对论文所研究的问题及其研究目的进行描述，对研究方法和过程进行简单介绍，对研究成果和所得结论进行概括。摘要应具有独立性和自明性，其内容应包含与论文全文同等量的主要信息。使读者即使不阅读全文，通过摘要就能了解论文的总体内容和主要成果。

论文摘要的书写应力求精确、简明。切忌写成对论文书写内容进行提要的形式，尤其要避免“第 1 章……；第 2 章……；……”这种或类似的陈述方式。

关键词是为了文献标引工作、用以表示全文主要内容信息的单词或术语。关键词不超过 5 个，每个关键词中间用分号分隔。

**关键词：**关键词 1；关键词 2；关键词 3；关键词 4；关键词 5

## Abstract

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summary of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

**Keywords:** keyword 1; keyword 2; keyword 3; keyword 4; keyword 5

# 目 录

第 1 章 引 言.....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 论文内容 .....	3
参考文献.....	4
附录 A 补充内容 .....	5
致 谢.....	7
声 明.....	8

## 插图清单

图 1.1 云网络为音视频通话提供服务.....	1
--------------------------	---



## 附表清单

## 符号和缩略语说明

PI 聚酰亚胺

# 第 1 章 引 言

## 1.1 研究背景

云网络（Cloud Networking）是一种新型的网络部署与管理架构。云网络服务商通过预先在全球各地部署服务器与网络资源，其他软件服务的服务商可以通过租用这些计算和网络资源，并将他们进行互联，组建适用于自身业务需求的遍布全球的云网络。云网络是在物理网络及计算资源之上构建的逻辑网络，扩展或重新配置时只需要进行软件设置，而不需要对网络设备硬件进行更改。云网络易于配置、可靠性高、易于扩展等众多优点使得它被广泛应用于文件传输、实时音视频通话、企业资源管理等多种服务中。

对于跨区域的实时音视频通话业务，通话服务的服务商需要建立一条连接通话用户两端的双向连接。如图1.1，通常，通话服务商选择使用云网络为进行通话的用户建立连接。通话的用户各自选择距离自己最近云网络接入网关接入云网络，数据经由云网关进入云网络进行转发，再从接收端用户接入的云网关发至接收端用户。对于实时通信业务来说，传输的延迟以及传输视频的卡顿率极大地影响用户体验（Quality of Experience, QoE）<sup>[1]</sup>，因此为了维持优秀的用户体验，云网络提供商必须确保云网络提供低延迟、低丢包率的转发链路。

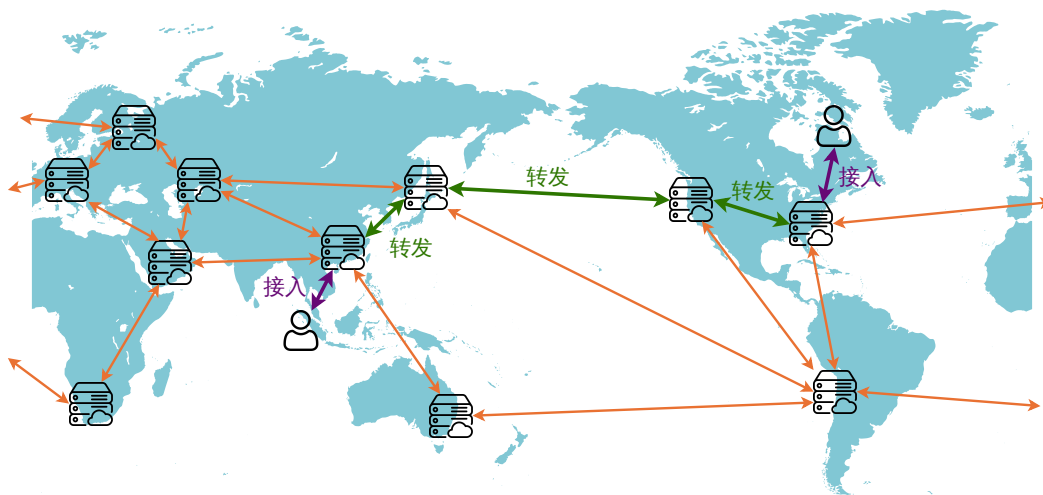


图 1.1 云网络为音视频通话提供服务

在云网络中，同一条逻辑链路的连接可以由多条物理链路抽象而成，云网络服务商通常同时提供专线与公网链路作为同一条物理链路的可选物理链路。通常来讲，专线的质量较高，延迟较低且稳定、丢包率低，能提供较好的传输质量和用

用户体验，但是高昂的价格对云服务商大规模使用带来挑战；与之相对地，公网链路的价格较低，但是容易受到网络中其它用户的影响，容易发生拥塞和竞争，传输质量容易发生波动，不能提供稳定优质的用户体验。因此，近期的研究主要聚焦在如何优化云网络的以在用户体验与运营成本之间取得平衡。

物理链路调度类的工作<sup>[1,2]</sup>通过不断监控同一逻辑链路下的公网链路质量，并在公网质量优秀可以为用户提供优质服务的时段将部分流量经由公网链路发送，从而希望能以此降低在专线上发送的数据流量，从而降低使用专线的成本。然而实际上，本研究的测量表明用户的高需求时段与公网链路质量下降时段基本重合，有大量流量需要提供服务时恰逢公网链路质量下降不能满足用户体验需求，公网链路的分流效果有限，大量流量仍旧通过专线转发，实际成本下降效果有限。

链路优化工作<sup>[3,4]</sup>则放弃使用专线链路，通过在发送端加入冗余信息以对抗在公网链路上传输时，可能遭遇的丢包。然而，为了尽可能地恢复丢失的信息，算法必须悲观地估计在链路上传输时可能遭遇的最差情况，并据此估算需要加入的冗余信息量。这使得链路上为了恢复一小部分可能的丢包而额外传输了大量的冗余数据，造成了带宽的浪费，同时也提升了使用链路的流量成本。

已有的这些方法都没有很好地解决用户质量与运营成本的平衡问题，因为它们：

- 没有考虑用户需求升高与公网链路质量下降的时间相关性；
- 没有对公网链路丢包特性进行细致的建模。

这些工作都对真实公网的性质没有细致的研究，因而提出的方法不能很好地适应实际情况，造成运营成本居高不下。

本文的作者通过在世界各地部署测试服务器，对真实的公网链路进行了持续的测量，并根据测量的结果，产生了两点观察：

1. 不同的公网链路的质量差距大。部分公网链路质量高，延迟稳定且丢包少，质量与专线几乎相同；还有一些公网链路的质量低，延迟不稳定，且易出现较为严重的丢包现象。这些低质量的公网链路通常是跨国链路。对于一条跨域的云网络连接，它通常在云网络内部也分为多段接力转发（见图1.1），而丢包通常只集中发生在跨域的一段链路中，使得端到端测量得到的丢包率较高；
2. 在丢包率较高的链路中，连续丢包的情况较为常见。一般的冗余算法直接在一数据包发送之后立刻附上与之相匹配的冗余包，在公网链路上因连续丢包而导致同时丢失了数据包和冗余包而导致最终无法恢复丢失的数据。

基于这两点观察, 本文设计了一套新的基于交织前向纠错编码 (Interleaved Forward Error Correction, Interleaved FEC) 的跨国公网链路优化方法。本文提出的方法使用公网实现云网络中所有节点的互联, 但只在低质量的链路片段上应用 FEC 冗余编码进行链路质量修复。本方法不需要使用专线连接, 极大地降低了链路的使用成本, 有选择性地在低质量链路上使用冗余编码, 避免了在高质量链路上添加额外带宽。另外, 应用交织编码技术, 将冗余包与数据包间隔其它数据包发送, 极大地降低了链路连续丢包对丢包恢复的影响。

本文作者使用 Rust 语言实现了基于本方法的分布式云网络转发与针对低质量链路的冗余包计算及丢包恢复算法。经过对真实网络的模拟实验, 本文提出的方法将端到端带宽提升了 xxx, 流完成时间减少了 xxx。

总结而言, 本文主要的贡献是:

- 通过对公网链路的真实测量, 指出了长距离跨域公网链路质量差的核心在于单段跨域链路片段存在链路质量差、连续丢包多的特性;
- 提出了通过针对性地对低质量链路片段加入冗余, 以最低的额外带宽开销实现对链路整体质量的提升;
- 实现并测量了本文提出的链路优化方法在跨国公网链路场景下对端到端性能的提升。

## 1.2 论文内容

## 参考文献

- [1] Kataria B, Lnu P, Bothra R, et al. Saving private wan: Using internet paths to offload wan traffic in conferencing services[J]. Proceedings of the ACM on Networking, 2024, 2(CoNEXT4): 1-22.
- [2] Wu B, Qian K, Li B, et al. Xron: A hybrid elastic cloud overlay network for video conferencing at planetary scale[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2023 Conference. 2023: 696-709.
- [3] Huang T Y, Huang P, Chen K T, et al. Could skype be more satisfying? a qoe-centric study of the fec mechanism in an internet-scale voip system[J]. IEEE Network, 2010, 24(2): 42-48.
- [4] Holmer S, Shemer M, Paniconi M. Handling packet loss in webrtc[C]//2013 IEEE international conference on image processing. IEEE, 2013: 1860-1864.

## 附录 A 补充内容

附录是与论文内容密切相关、但编入正文又影响整篇论文编排的条理和逻辑性的资料，例如某些重要的数据表格、计算程序、统计表等，是论文主体的补充内容，可根据需要设置。

附录中的图、表、数学表达式、参考文献等另行编序号，与正文分开，一律用阿拉伯数字编码，但在数码前冠以附录的序号，例如“图 A.1”，“表 A.1”，“式（A.1）”等。

### A.1 插图

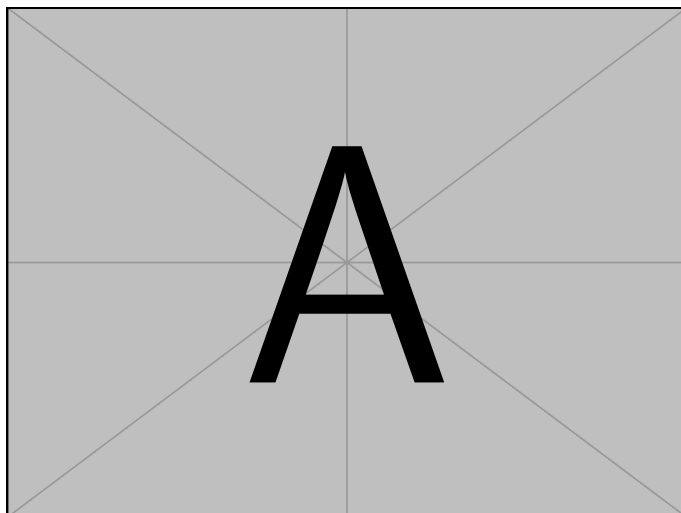


图 A.1 附录中的图片示例

### A.2 表格

表 A.1 附录中的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.bbx	BibLaTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.cbx	BibLaTeX 引用样式文件

### A.3 数学表达式

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (\text{A.1})$$

### A.4 文献引用

附录<sup>[?]</sup>中的参考文献引用<sup>[?]</sup>示例<sup>[? ?]</sup>。

参考文献



## 致 谢

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的综合论文训练论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_