

# 无线 Mesh 视频传输网络 QoS 优化技术研究

(申请清华大学工程硕士学位论文)

培 养 单 位：软 件 学 院

学 科：软 件 工 程

研 究 生：王 锋

指 导 教 师：刘 云 浩 教 授

副指导教师：\*\*教 授

二〇一六年四月



# **Research of QoS improvement in wireless Mesh network for video transmission**

Thesis Submitted to  
**Tsinghua University**

in partial fulfillment of the requirement  
for the professional degree of  
**Master of Software Engineering**

by

**Wang Feng**  
**( Software Engineering )**

Thesis Supervisor : Professor Liu yunhao

**April, 2016**



# 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_



## 摘 要

无线 Mesh 网络作为一种新兴的无线网络技术,以其特有的优势正在对人们的生产生活产生日益显著的影响。传统的 AP 网络设备,在为移动设备提供无线接口的同时,需要以有线形式接入外部网络,极大的限制了 AP 网络的灵活性和覆盖范围。另一种更加泛在的无线网络— 3G / 4G 网络,虽然能够提供足够的网络覆盖范围,但网络基础设施部署和维护成本极高。在这样的背景下,无线 Mesh 网络以其优秀的灵活性、易部署等特性得到了广泛的尝试。目前,无线 Mesh 网络在校园、城市、野外、救灾、油田等很多场景下得到积极的推广和应用。但在提供便捷、灵活的网络接入方式的同时,也因其高度动态的路由机制带来了很多网络应用上的不足,比如无线链路的不稳定性,严重的信号间干扰,整体 QoS 无法保障等。本文的主要工作集中在解决无线 Mesh 网络在视频监控场景下的 QoS 保障所面临的挑战,所提出的技术方案在无线 Mesh 网络实际部署中亦具有指导意义。

本文的创新点主要有:

- 大规模无线 Mesh 网络实践;
- 跨层的 QoS 保障技术。

**关键词:** Mesh 网络; 视频监控; QoS; 正交信道

## **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 summarization 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.

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

**Key words:** Mesh Network; video surveillance; QoS; orthogonal channel



## 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 背景及意义 .....	1
1.2 主要工作 .....	1
1.3 文章组织结构 .....	2
1.4 封面相关 .....	2
1.5 字体命令 .....	2
1.6 表格样本 .....	3
1.6.1 基本表格 .....	3
1.6.2 复杂表格 .....	3
1.6.3 其它 .....	7
1.7 定理环境 .....	8
1.8 参考文献 .....	11
1.9 公式 .....	12
第 2 章 相关工作 .....	14
2.1 无线 Mesh 网络 .....	14
2.2 无线 Mesh 网络中的路由技术 .....	14
2.2.1 主要路由技术 .....	15
2.2.2 优化的链路状态路由 (OLSR) .....	16
2.2.3 Ad-hoc 网络需求驱动的距离向量路由协议 (AODV) .....	16
2.2.4 针对移动 Ad-hoc 网络的路由协议 (BATMAN) .....	16
2.2.5 BATMAN 升级版 (BATMAN-adv) .....	16
2.3 802.11 协议簇 QoS 支持 .....	17
2.4 无线 Mesh 网络视频传输 .....	17
2.5 其它例子 .....	18
2.5.1 绘图 .....	18
2.5.2 插图 .....	18
第 3 章 项目设计 .....	21
3.1 项目描述 .....	21
3.2 BATMAN-adv 路由协议 .....	21
3.2.1 数据包类型 .....	21

3.2.2 节点发现.....	22
3.2.3 链路质量估计 .....	23
3.2.4 TQ 传播 .....	23
3.2.5 路由选择.....	24
3.3 全局 QoS 保障技术 .....	24
3.3.1 划分子网.....	25
3.3.2 视频帧权重队列映射 .....	25
3.3.3 移动场景下的 QoS 保障 .....	25
3.4 辅助模块开发 .....	25
第 4 章 项目实施 .....	27
4.1 信道隔离 .....	27
4.1.1 相邻链路干扰 .....	27
4.1.2 隐终端 .....	28
4.2 视频帧权重队列映射 .....	34
4.2.1 视频帧分层编码 .....	35
4.2.2 802.11e 增强分布式协调访问 (EDCA) .....	36
4.2.3 视频帧映射机制 .....	38
4.2.4 实验验证.....	42
插图索引 .....	43
表格索引 .....	45
公式索引 .....	46
参考文献 .....	47
致 谢 .....	49
声 明 .....	50
附录 A 外文资料原文 .....	51
A.1 Single-Objective Programming .....	51
A.1.1 Linear Programming .....	52
A.1.2 Nonlinear Programming.....	53
A.1.3 Integer Programming .....	54
附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译 .....	55
B.1 单目标规划 .....	55
B.1.1 线性规划.....	55

B.1.2 非线性规划 .....	56
B.1.3 整数规划.....	56
附录 C 其它附录 .....	57
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 .....	58

## 主要符号对照表

HPC	高性能计算 (High Performance Computing)
cluster	集群
Itanium	安腾
SMP	对称多处理
API	应用程序编程接口
PI	聚酰亚胺
MPI	聚酰亚胺模型化合物, N-苯基邻苯酰亚胺
PBI	聚苯并咪唑
MPBI	聚苯并咪唑模型化合物, N-苯基苯并咪唑
PY	聚吡咯
PMDA-BDA	均苯四酸二酐与联苯四胺合成的聚吡咯薄膜
$\Delta G$	活化自由能 (Activation Free Energy)
$\chi$	传输系数 (Transmission Coefficient)
$E$	能量
$m$	质量
$c$	光速
$P$	概率
$T$	时间
$v$	速度
劝学	<p>君子曰：学不可以已。青，取之于蓝，而青于蓝；冰，水为之，而寒于水。木直中绳。鞣以为轮，其曲中规。虽有槁暴，不复挺者，鞣使之然也。故木受绳则直，金就砺则利，君子博学而日参省乎己，则知明而行无过矣。吾尝终日而思矣，不如须臾之所学也；吾尝跂而望矣，不如登高之博见也。登高而招，臂非加长也，而见者远；顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰。假舆马者，非利足也，而致千里；假舟楫者，非能水也，而绝江河，君子生非异也，善假于物也。积土成山，风雨兴焉；积水成渊，蛟龙生焉；积善成德，而神明自得，圣心备焉。故不积跬步，无以至千里；不积小流，无以成江海。骐驎一跃，不能十步；弩马十驾，功在不舍。锲而舍之，朽木不折；锲而不舍，金石可镂。蚓无爪牙之利，筋骨之强，上食埃土，下饮黄泉，用心一也。蟹</p>

六跪而二螯，非蛇鱗之穴无可寄托者，用心躁也。——荀况

## 第 1 章 引言

### 1.1 背景及意义

现在人们的生活越来越多的依赖于无线网络，不管是工作、学习、娱乐，无线网络都深刻的改变着人们以往的习惯。而目前，无线网络主要的接入形式可以分为两类，一类是通过无线 AP 接入有线网络，另一类是通过 3G / 4G 接入运营商网络。两者都有着各自的优势和缺陷。前者也就是无线 AP 接入，优势在于部署简单方便，但因为 AP 需要通过有线方式接入有线网络，很大程度上限制了网络部署的灵活性和网络的覆盖范围；后者也就是 3G / 4G 接入，虽然极大的扩展了无线网络的覆盖范围，但是部署及维护成本过高。由此可见，如何在高覆盖、高灵活性、高带宽、低成本等方面同时满足人们的需求，无线网络还存在巨大的发展空间。

面对上述需求，无线 Mesh 网络以其自组织、自治愈等特点吸引了学术界和工业界的眼球。然而现有的 Mesh 网络协议在链路度量、网络规模、适用场景等方面都或多或少存在缺陷，而且，现阶段 Mesh 网络在工业生产场景中的实际部署系统非常少，大多数还是实验床性质的部署，节点数量和实际使用上和实际的生产场景还是有很多的差异。因此，Mesh 网络的研究工作亟须基于实际运行系统的长期稳定测量数据作为依托进行规模和效率的进一步论证基础。

### 1.2 主要工作

本文基于室内大型实验床和室外实际运行系统进行了大量的实验，在实验过程中开发了一系列网络管理配置相关的工具，并深入 Mesh 网络各层进行以提升系统整体 QoS 为目标的优化。本文主要工作如下：

1. 采用业界较为广泛使用的一种无线 Mesh 网络协议——batman-adv，基于 linux 系统和 Mikrotik 硬件平台搭建实际运行的 Mesh 节点设备，并对 batman-adv 协议源码的各项参数指标进行了详细的测量。
2. 以 1 为基础，搭建室内 100 + 节点规模的实验床，及室外视频监控系统的承载网络。
3. 以 1 和 2 为基础，设计实现 Mesh 网络视频传输的跨层 QoS 优化方案。
4. 在伊拉克哈法亚油田部署基于 Mesh 网络的视频监控系统。

### 1.3 文章组织结构

本文第一章引言部分介绍文章的背景和意义，并介绍文章的主要工作和贡献。第二章介绍该领域的相关工作，面临的挑战。第三章介绍本文的核心工作。第四章总结全文。

小老鼠偷吃热凉粉；短长虫环绕矮高粱<sup>①</sup>。

### 1.4 封面相关

封面的例子请参看 `cover.tex`。主要符号表参看 `denation.tex`，附录和个人简历分别参看 `appendix01.tex` 和 `resume.tex`。里面的命令都很只管，一看即会<sup>②</sup>。

### 1.5 字体命令

苏轼（1037-1101），北宋文学家、书画家。字子瞻，号东坡居士，眉州眉山（今属四川）人。苏洵子。嘉佑进士。神宗时曾任祠部员外郎，因反对王安石新法而求外职，任杭州通判，知密州、徐州、湖州。后以作诗“谤讟朝廷”罪贬黄州。哲宗时任翰林学士，曾出知杭州、颖州等，官至礼部尚书。后又贬谪惠州、儋州。北还后第二年病死常州。南宋时追谥文忠。与父洵弟辙，合称“三苏”。在政治上属于旧党，但也有改革弊政的要求。其文汪洋恣肆，明白畅达，为“唐宋八大家”之一。其诗清新豪健，善用夸张比喻，在艺术表现方面独具风格。少数诗篇也能反映民间疾苦，指责统治者的奢侈骄纵。词开豪放一派，对后代很有影响。《念奴娇·赤壁怀古》、《水调歌头·丙辰中秋》传诵甚广。

坡仙擅长行书、楷书，取法李邕、徐浩、颜真卿、杨凝式，而能自创新意。用笔丰腴跌宕，有天真烂漫之趣。与蔡襄、黄庭坚、米芾并称“宋四家”。能画竹，学文同，也喜作枯木怪石。论画主张“神似”，认为“论画以形似，见与儿童邻”；高度评价“诗中有画，画中有诗”的艺术造诣。诗文有《东坡七集》等。存世书迹有《答谢民师论文帖》、《祭黄几道文》、《前赤壁赋》、《黄州寒食诗帖》等。画迹有《枯木怪石图》、《竹石图》等。

易与天地准，故能弥纶天地之道。仰以观於天文，俯以察於地理，是故知幽明之故。原始反终，故知死生之说。精气为物，游魂为变，是故知鬼神之情状。与天地相似，故不违。知周乎万物，而道济天下，故不过。旁行而不流，乐天知命，故

<sup>①</sup> 韩愈（768-824），字退之，河南河阳（今河南孟县）人，自称郡望昌黎，世称韩昌黎。幼孤贫刻苦好学，德宗贞元八年进士。曾任监察御史，因上疏请免关中赋役，贬为阳山县令。后随宰相裴度平定淮西迁刑部侍郎，又因上表谏迎佛骨，贬潮州刺史。做过吏部侍郎，死谥文公，故世称韩吏部、韩文公。是唐代古文运动领袖，与柳宗元合称韩柳。诗力求险怪新奇，雄浑重气势。

<sup>②</sup> 你说还是看不懂？怎么会呢？

不忧。安土敦乎仁，故能爱。范围天地之化而不过，曲成万物而不遗，通乎昼夜之道而知，故神无方而易无体。

有天地，然后万物生焉。盈天地之间者，唯万物，故受之以屯；屯者盈也，屯者物之始生也。物生必蒙，故受之以蒙；蒙者蒙也，物之穉也。物穉不可不养也，故受之以需；需者饮食之道也。饮食必有讼，故受之以讼。讼必有众起，故受之以师；师者众也。众必有所比，故受之以比；比者比也。比必有所畜也，故受之以小畜。物畜然后有礼，故受之以履。

履而泰，然后安，故受之以泰；泰者通也。物不可以终通，故受之以否。物不可以终否，故受之以同人。与人同者，物必归焉，故受之以大有。有大者不可以盈，故受之以谦。有大而能谦，必豫，故受之以豫。豫必有随，故受之以随。以喜随人者，必有事，故受之以蛊；蛊者事也。

有事而后可以大，故受之以临；临者大也。物大然后可以观，故受之以观。可观而后有所合，故受之以噬嗑；嗑者合也。物不可以苟合而已，故受之以贲；贲者饰也。致饰然后亨，则尽矣，故受之以剥；剥者剥也。物不可以终尽，剥穷上反下，故受之以复。复则不妄矣，故受之以无妄。

有无妄然后可以畜，故受之以大畜。物畜然后可以养，故受之以颐；颐者养也。不养则不可动，故受之以大过。物不可以终过，故受之以坎；坎者陷也。陷必有所丽，故受之以离；离者丽也。

## 1.6 表格样本

### 1.6.1 基本表格

模板中关于表格的宏包有三个：`booktabs`、`array` 和 `longtabular`，命令有一个 `\hlinewd`。三线表可以用 `booktabs` 提供的 `\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule`。它们与 `longtable` 能很好的配合使用。如果表格比较简单的话可以直接用命令 `\hlinewd{<width>}` 控制。

首先来看一个最简单的表格。表 1.1 列举了本模板主要文件及其功能。请大家注意三线表中各条线对应的命令。这个例子还展示了如何在表格中正确使用脚注。由于  $\text{\LaTeX}$  本身不支持在表格中使用 `\footnote`，所以我们不得不将表格放在小页中，而且最好将表格的宽度设置为小页的宽度，这样脚注看起来才更美观。

### 1.6.2 复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。前面的脚注是一种不错的方法，如果不喜欢脚注，可以在表格后面写注释，比如表 1.2。



表 1.1 模板文件。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观，所以要像 `chapter` 那样在前面用中括号写一个简短的标题。这个标题会出现在索引中。

文件名	描述
<code>thuthesis.ins</code>	$\text{\LaTeX}$ 安装文件， <code>DocStrip</code> <sup>①</sup>
<code>thuthesis.dtx</code>	所有的一切都在这里面 <sup>②</sup> 。
<code>thuthesis.cls</code>	模板类文件。
<code>thuthesis.cfg</code>	模板配置文。 <code>cls</code> 和 <code>cfg</code> 由前两个文件生成。
<code>thuthesis.bst</code>	参考文献 $\text{\BIBTeX}$ 样式文件。
<code>thuthesis.sty</code>	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。

① 表格中的脚注

② 再来一个

表 1.2 复杂表格示例 1

x \ y	First Half		Second Half	
	1st Qtr	2nd Qtr	3rd Qtr	4th Qtr
East*	20.4	27.4	90	20.4
West**	30.6	38.6	34.6	31.6

注：数据来源《`ThUthesis` 使用手册》。

\*：东部

\*\*：西部

此外，表 1.2 同时还演示了另外两个功能：1) 通过 `tabularx` 的 `|x|` 扩展实现表格自动放大；2) 通过命令 `\diagbox` 在表头部分插入反斜线。

为了使我们的例子更接近实际情况，我会在必要的时候插入一些“无关”文字，以免太多图表同时出现，导致排版效果不太理想。第一个出场的当然是我的最爱：风流潇洒、骏马绝尘、健笔凌云的李白了。

李白，字太白，陇西成纪人。凉武昭王暕九世孙。或曰山东人，或曰蜀人。白少有逸才，志气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏颋见而异之，曰：“是子天才英特，可比相如。”天宝初，至长安，往见贺知章。知章见其文，叹曰：“子谪仙人也。”言于明皇，召见金銮殿，奏颂一篇。帝赐食，亲为调羹，有诏供奉翰林。白犹与酒徒饮于市，帝坐沉香亭子，意有所感，欲得白为乐章，召入，而白已醉。左右以水颰面，稍解，援笔成文，婉丽精切。帝爱其才，数宴见。白常侍帝，醉，使高力士脱靴。力士素贵，耻之，摘其诗以激杨贵妃。帝欲官白，妃辄沮止。白自知不为亲近所容，恳求还山。帝赐金放还。乃浪迹江湖，终日沉饮。永王璘都

督江陵，辟为僚佐。璘谋乱，兵败，白坐长流夜郎，会赦得还。族人阳冰为当涂令，白往依之。代宗立，以左拾遗召，而白已卒。文宗时，诏以白歌诗、裴旻剑舞、张旭草书为三绝云。集三十卷。今编诗二十五卷。——《全唐诗》诗人小传

浮动体的并排放置一般有两种情况：1) 二者没有关系，为两个独立的浮动体；2) 二者隶属于同一个浮动体。对表格来说并排表格既可以像图 1.3、图 1.4 使用小页环境，也可以如图 1.5 使用子表格来做。图的例子参见第 2.5.2.2 节。

表 1.3 第一个并排子表格

111	222
222	333

表 1.4 第二个并排子表格

111	222
222	333

然后就是忧国忧民，诗家楷模杜工部了。杜甫，字子美，其先襄阳人，曾祖依艺为巩令，因居巩。甫天宝初应进士，不第。后献《三大礼赋》，明皇奇之，召试文章，授京兆府兵曹参军。安禄山陷京师，肃宗即位灵武，甫自贼中遁赴行在，拜左拾遗。以论救房琯，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采椽，餽糒不给。久之，召补京兆府功曹，道阻不赴。严武镇成都，奏为参谋、检校工部员外郎，赐绯。武与甫世旧，待遇甚厚。乃于成都浣花里种竹植树，枕江结庐，纵酒啸歌其中。武卒，甫无所依，乃之东蜀就高适。既至而适卒。是岁，蜀帅相攻杀，蜀大扰。甫携家避乱荆楚，扁舟下峡，未维舟而江陵亦乱。乃溯沿湘流，游衡山，寓居耒阳。卒年五十九。元和中，归葬偃师首阳山，元稹志其墓。天宝间，甫与李白齐名，时称李杜。然元稹之言曰：“李白壮浪纵恣，摆去拘束，诚亦差肩子美矣。至若铺陈终始，排比声韵，大或千言，次犹数百，词气豪迈，而风调清深，属对律切，而脱弃凡近，则李尚不能历其藩翰，况堂奥乎。”白居易亦云：“杜诗贯穿古今，尽工尽善，殆过于李。”元、白之论如此。盖其出处劳佚，喜乐悲愤，好贤恶恶，一见于诗。而又以忠君忧国、伤时念乱为本旨。读其诗可以知其世，故当时谓之“诗史”。旧集诗文共六十卷，今编诗十九卷。

表 1.5 并排子表格

(a) 第一个子表格

111	222
222	333

(b) 第二个子表格

111	222
222	333

不可否认  $\text{\LaTeX}$  的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要足够认真，足够细致，同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 1.6。

表 1.6 复杂表格示例 2

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大侠了。王维，字摩诘，河东人。工书画，与弟缙俱有俊才。开元九年，进士擢第，调太乐丞。坐累为济州司仓参军，历右拾遗、监察御史、左补阙、库部郎中，拜吏部郎中。天宝末，为给事中。安禄山陷两都，维为贼所得，服药阳喑，拘于菩提寺。禄山宴凝碧池，维潜赋诗悲悼，闻于行在。贼平，陷贼官三等定罪，特原之，责授太子中允，迁中庶子、中书舍人。复拜给事中，转尚书右丞。维以诗名盛于开元、天宝间，宁薛诸王驸马豪贵之门，无不拂席迎之。得宋之问辋川别墅，山水绝胜，与道友裴迪，浮舟往来，弹琴赋诗，啸咏终日。笃于奉佛，晚年长斋禅诵。一日，忽索笔作书数纸，别弟缙及平生亲故，舍笔而卒。赠秘书监。宝应中，代宗问缙：“朕常于诸王坐闻维乐章，今存几何？”缙集诗六卷，文四卷，表上之。敕答云，卿伯氏位列先朝，名高希代。抗行周雅，长揖楚辞。诗家者流，时论归美。克成编录，叹息良深。殷璠谓维诗词秀调雅，意新理惬。在泉成珠，著壁成绘。苏轼亦云：“维诗中有画，画中有诗也。”今编诗四卷。

要想用好论文模板还是得提前学习一些  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}/\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的相关知识，具备一些基本能力，掌握一些常见技巧，否则一旦遇到问题还真是比较麻烦。我们见过很多这样的同学，一直以来都是使用 Word 等字处理工具，以为  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  模板的用法也应该类似，所以就沿袭同样的思路来对待这种所见非所得的排版工具，结果被折腾的焦头烂额，疲惫不堪。

如果您要排版的表格长度超过一页，那么推荐使用 `longtable` 或者 `supertabular` 宏包，模板对 `longtable` 进行了相应的设置，所以用起来可能简单一些。表 1.7 就是 `longtable` 的简单示例。

表 1.7 实验数据

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
CG.A.2	23.05	0.002	0.116	0.035	0.589	32491
CG.A.4	15.06	0.003	0.067	0.021	0.351	18211
CG.A.8	13.38	0.004	0.072	0.023	0.210	9890

续下页

续表 1.7 实验数据

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
CG.B.2	867.45	0.002	0.864	0.232	3.256	228562
CG.B.4	501.61	0.003	0.438	0.136	2.075	123862
CG.B.8	384.65	0.004	0.457	0.108	1.235	63777
MG.A.2	112.27	0.002	0.846	0.237	3.930	236473
MG.A.4	59.84	0.003	0.442	0.128	2.070	123875
MG.A.8	31.38	0.003	0.476	0.114	1.041	60627
MG.B.2	526.28	0.002	0.821	0.238	4.176	236635
MG.B.4	280.11	0.003	0.432	0.130	1.706	123793
MG.B.8	148.29	0.003	0.442	0.116	0.893	60600
LU.A.2	2116.54	0.002	0.110	0.030	0.532	28754
LU.A.4	1102.50	0.002	0.069	0.017	0.255	14915
LU.A.8	574.47	0.003	0.067	0.016	0.192	8655
LU.B.2	9712.87	0.002	0.357	0.104	1.734	101975
LU.B.4	4757.80	0.003	0.190	0.056	0.808	53522
LU.B.8	2444.05	0.004	0.222	0.057	0.548	30134
EP.A.2	123.81	0.002	0.010	0.003	0.074	1834
EP.A.4	61.92	0.003	0.011	0.004	0.073	1743
EP.A.8	31.06	0.004	0.017	0.005	0.073	1661
EP.B.2	495.49	0.001	0.009	0.003	0.196	2011
EP.B.4	247.69	0.002	0.012	0.004	0.122	1663
EP.B.8	126.74	0.003	0.017	0.005	0.083	1656

### 1.6.3 其它

如果不想让某个表格或者图片出现在索引里面, 请使用命令 `\caption*`。这个命令不会给表格编号, 也就是出来的只有标题文字而没有“表 XX”, “图 XX”, 否则索引里面序号不连续就显得不伦不类, 这也是  $\text{\LaTeX}$  里星号命令默认的规则。

有这种需求的多是本科同学的英文资料翻译部分, 如果觉得附录中英文原文中的表格和图片显示成“表”和“图”不协调的话, 一个很好的办法就是用 `\caption*`, 参数随便自己写, 比如不守规矩的表 1.111 和图 1.111 能满足这种特殊需要 (可以参看附录部分)。

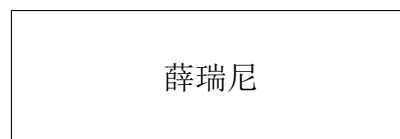
如果的确想让它编号, 但又不想让它出现在索引中的话, 目前模板上不支持。

最后, 虽然大家不一定会独立使用小页, 但是关于小页中的脚注还是有必要提一下。请看下面的例子。

表 1.111 这是一个手动编号，不出现在索引中的表格。

THUThesis
-----------

Figure 1.111 这是一个手动编号，不出现在索引中的图。



柳宗元，字子厚（773-819），河东（今永济县）人<sup>①</sup>，是唐代杰出的文学家，哲学家，同时也是一位政治改革家。与韩愈共同倡导唐代古文运动，并称韩柳<sup>②</sup>。

① 山西永济水饺。

② 唐宋八大家之首二位。

唐朝安史之乱后，宦官专权，藩镇割据，土地兼并日渐严重，社会生产破坏严重，民不聊生。柳宗元对这种社会现实极为不满，他积极参加了王叔文领导的“永济革新”，并成为这一运动的中坚人物。他们革除弊政，打击权奸，触犯了宦官和官僚贵族利益，在他们的联合反扑下，改革失败了，柳宗元被贬为永州司马。

## 1.7 定理环境

给大家演示一下各种和证明有关的环境：

**假设 1.1：** 待月西厢下，迎风户半开；隔墙花影动，疑是玉人来。

$$c = a^2 - b^2 \quad (1-1)$$

$$= (a + b)(a - b) \quad (1-2)$$

千辛万苦，历尽艰难，得有今日。然相从数千里，未曾哀戚。今将渡江，方图百年欢笑，如何反起悲伤？（引自《杜十娘怒沉百宝箱》）

**定义 1.1：** 子曰：「道千乘之国，敬事而信，节用而爱人，使民以时。」

千古第一定义！问世间、情为何物，只教生死相许？天南地北双飞客，老翅几回寒暑。欢乐趣，离别苦，就中更有痴儿女。君应有语，渺万里层云，千山暮雪，只影向谁去？

横汾路，寂寞当年箫鼓，荒烟依旧平楚。招魂楚些何嗟及，山鬼暗啼风雨。天也妒，未信与，莺儿燕子俱黄土。千秋万古，为留待骚人，狂歌痛饮，来访雁丘处。

**命题 1.1：** 曾子曰：「吾日三省吾身——为人谋而不忠乎？与朋友交而不信乎？传不习乎？」

多么凄美的命题啊！其日牛马嘶，新妇入青庐，奄奄黄昏后，寂寂人定初，我命绝今日，魂去尸长留，揽裙脱丝履，举身赴清池，府吏闻此事，心知长别离，徘徊庭树下，自挂东南枝。

注释 1.1： 天不言自高，水不言自流。

$$\begin{aligned}\varphi(x, z) &= z - \gamma_{10}x - \gamma_{mn}x^m z^n \\ &= z - Mr^{-1}x - Mr^{-(m+n)}x^m z^n\end{aligned}$$

$$\zeta^0 = (\xi^0)^2, \quad (1-3)$$

$$\zeta^1 = \xi^0 \xi^1, \quad (1-4)$$

$$\zeta^2 = (\xi^1)^2, \quad (1-5)$$

天尊地卑，乾坤定矣。卑高以陈，贵贱位矣。动静有常，刚柔断矣。方以类聚，物以群分，吉凶生矣。在天成象，在地成形，变化见矣。鼓之以雷霆，润之以风雨，日月运行，一寒一暑，乾道成男，坤道成女。乾知大始，坤作成物。乾以易知，坤以简能。易则易知，简则易从。易知则有亲，易从则有功。有亲则可久，有功则可大。可久则贤人之德，可大则贤人之业。易简，而天下矣之理矣；天下之理得，而成位乎其中矣。

公理 1.1： 两点间直线段距离最短。

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (1-6)$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (1-7)$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (1-8)$$

《彖曰》：大哉乾元，万物资始，乃统天。云行雨施，品物流形。大明始终，六位时成，时乘六龙以御天。乾道变化，各正性命，保合大和，乃利贞。首出庶物，万国咸宁。

《象曰》：天行健，君子以自强不息。潜龙勿用，阳在下也。见龙再田，德施普也。终日乾乾，反复道也。或跃在渊，进无咎也。飞龙在天，大人造也。亢龙有悔，盈不可久也。用九，天德不可为首也。

引理 1.1：《猫和老鼠》是我最爱看的动画片。

$$\begin{aligned} \int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y) dx \right\} dy \\ = \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} dy \end{aligned}$$

行行重行行，与君生别离。相去万余里，各在天一涯。道路阻且长，会面安可知。胡马依北风，越鸟巢南枝。相去日已远，衣带日已缓。浮云蔽白日，游子不顾返。思君令人老，岁月忽已晚。弃捐勿复道，努力加餐饭。

**定理 1.1:** 犯我强汉者，虽远必诛

——陈汤（汉）

$$y = 1 \quad (1-9a)$$

$$y = 0 \quad (1-9b)$$

道可道，非常道。名可名，非常名。无名天地之始；有名万物之母。故常无，欲以观其妙；常有，欲以观其徼。此两者，同出而异名，同谓之玄。玄之又玄，众妙之门。上善若水。水善利万物而不争，处众人之所恶，故几于道。曲则全，枉则直，洼则盈，敝则新，少则多，多则惑。人法地，地法天，天法道，道法自然。知人者智，自知者明。胜人者有力，自胜者强。知足者富。强行者有志。不失其所者久。死而不亡者寿。

**证明** 燕赵古称多感慨悲歌之士。董生举进士，连不得志于有司，怀抱利器，郁郁适兹土，吾知其必有合也。董生勉乎哉？

夫以子之不遇时，苟慕义强仁者，皆爱惜焉，矧燕、赵之士出乎其性者哉！然吾尝闻风俗与化移易，吾恶知其今不异于古所云邪？聊以吾子之行卜之也。董生勉乎哉？

吾因子有所感矣。为我吊望诸君之墓，而观于其市，复有昔时屠狗者乎？为我谢曰：“明天子在上，可以出而仕矣！”

——韩愈《送董邵南序》

□

**推论 1.1:** 四川话配音的《猫和老鼠》是世界上最好看最好听最有趣的动画片。

$$V_i = v_i - q_i v_j, \quad X_i = x_i - q_i x_j, \quad U_i = u_i, \quad \text{for } i \neq j; \quad (1-10)$$

$$V_j = v_j, \quad X_j = x_j, \quad U_j u_j + \sum_{i \neq j} q_i u_i. \quad (1-11)$$

迢迢牵牛星，皎皎河汉女。纤纤擢素手，札札弄机杼。终日不成章，泣涕零如雨。河汉清且浅，相去复几许。盈盈一水间，脉脉不得语。

例 1.1: 大家来看这个例子。

$$\begin{cases} \nabla f(\mathbf{x}^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(\mathbf{x}^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (1-12)$$

练习 1.1: 清列出 Andrew S. Tanenbaum 和 W. Richard Stevens 的所有著作。

猜想 1.1: *Poincare Conjecture* If in a closed three-dimensional space, any closed curves can shrink to a point continuously, this space can be deformed to a sphere.

问题 1.1: 回答还是不回答，是个问题。

如何引用定理 1.1 呢？加上 \label 使用 \ref 即可。妾发初覆额，折花门前剧。郎骑竹马来，绕床弄青梅。同居长干里，两小无嫌猜。十四为君妇，羞颜未尝开。低头向暗壁，千唤不一回。十五始展眉，愿同尘与灰。常存抱柱信，岂上望夫台。十六君远行，瞿塘滟滪堆。五月不可触，猿声天上哀。门前迟行迹，一一生绿苔。苔深不能扫，落叶秋风早。八月蝴蝶来，双飞西园草。感此伤妾心，坐愁红颜老。

## 1.8 参考文献

当然参考文献可以直接写 \bibitem，虽然费点功夫，但是好控制，各种格式可以自己随意改写。

本模板推荐使用 **BIB<sub>T</sub>E<sub>X</sub>**，样式文件为 thuthesis.bst，基本符合学校的参考文献格式（如专利等引用未加详细测试）。看看这个例子，关于书的<sup>[1-3]</sup>，还有这些<sup>[4-6]</sup>，关于杂志的<sup>[7-9]</sup>，硕士论文<sup>[10,11]</sup>，博士论文<sup>[12,13]</sup>，标准文件<sup>[14]</sup>，会议论文<sup>[15,16]</sup>，技术报告<sup>[17]</sup>，电子文献<sup>[18,19]</sup>。中文参考文献<sup>[20]</sup>应增加 lang="zh" 字段，以便进行相应处理。另外，本模板对中文文献<sup>[21]</sup>的支持并不是十全十美，如果有不如意的地方，请手动修改 bbl 文件。

有时候不想要上标，那么可以这样 [12]，这个非常重要。

有时候一些参考文献没有纸质出处，需要标注 URL。缺省情况下，URL 不会在连字符处断行，这可能使得用连字符代替空格的网址分行很难看。如果需要，可以将模板类文件中

```
\RequirePackage{hyperref}
```



一行改为:

```
\PassOptionsToPackage{hyphens}{url}
\RequirePackage{hyperref}
```

使得连字符处可以断行。更多设置可以参考 url 宏包文档。

## 1.9 公式

贝叶斯公式如式 (1-13), 其中  $p(y|\mathbf{x})$  为后验;  $p(\mathbf{x})$  为先验; 分母  $p(\mathbf{x})$  为归一化因子。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (1-13)$$

论文里面公式越多,  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  就越 happy。再看一个 `amsmath` 的例子:

$$\det \mathbf{K}(t = 1, t_1, \dots, t_n) = \sum_{I \in \mathbf{n}} (-1)^{|I|} \prod_{i \in I} t_i \prod_{j \in I} (D_j + \lambda_j t_j) \det \mathbf{A}^{(\lambda)}(\bar{I}|\bar{I}) = 0. \quad (1-14)$$

前面定理示例部分列举了很多公式环境, 可以说把常见的情况都覆盖了, 大家在写公式的时候一定要好好看 `amsmath` 的文档, 并参考模板中的用法:

$$\begin{aligned} \int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y) dx \right\} dy \\ = \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} dy \end{aligned}$$

其实还可以看看这个多级规划:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_x F(x, y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \\ \text{subject to:} \\ G(x) \leq 0 \\ (y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \text{ solves problems } (i = 1, 2, \dots, m) \\ \left\{ \begin{array}{l} \max_{y_i} f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{subject to:} \\ g_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \leq 0. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1-15)$$

这些跟规划相关的公式都来自于刘宝碇老师《不确定规划》的课件。

## 第 2 章 相关工作

本章首先介绍 Mesh 网络架构，对现有的工业界和学术界的 Mesh 网络实验平台和项目做综述，然后总结它们的贡献、优势和缺陷。然后介绍 QoS 在 802.11 协议族中的基本实现机制，并讨论在 Mesh 网络中应用 QoS 保障面临的困难。最后集中在 Mesh 网络基础上的视频传输 QoS 保障技术的研究应用。

### 2.1 无线 Mesh 网络

在存在基础管理结构的无线网络中，路由信息通常由中央控制的角色提供，如 AP 网络中的 AC。这样可以实现网络资源的全局调度和管控。相反，在 ad-hoc 模式下，不存在中央控制的角色，网络中的路由构建由参与网络的节点设备自发交互完成。作为典型的 ad-hoc 模式的无线网络架构，无线 Mesh 网络中的节点之间通过交互链路状态和局部路由信息从而构建起全局的网状网络架构。

无线 Mesh 网络由 Mesh 路由器，Mesh 客户端组成。其中，Mesh 路由器提供路由构建和异构网络接入的功能。Mesh 客户端为用户接入 Mesh 网络提供接口。[插图]

无线 Mesh 网络是具有广阔应用前景的下一代无线网络技术。其自组织、移动和灵活的网络构建使其能够适用于很多传统网络无法覆盖的场景，比如：救灾、野外、战场等临时性应用且缺乏有线网络基础设施，并且可以作为 3G / 4G 网络的一个很好的延伸。无线 Mesh 网络的主要优势体现在快速、低成本的部署和大范围的网络覆盖。

在过去的十多年里，伴随着无线 Mesh 网络的研究热潮，很多的项目开发了不同的 Mesh 网络路由协议，802.11 协议簇也将 Mesh 网络的标准制定纳入讨论并提出完善的修正案。但目前 802.11 所提出的修正案中的 Mesh 路由协议并没有在工业界得到广泛的使用，各种不同的路由协议仍然以各自的社区为依托不断发展完善。

### 2.2 无线 Mesh 网络中的路由技术

在无线 mesh 网络中，当节点互相不在信号覆盖范围内时，就需要中继节点代为转发。很多的 Mesh 网络协议可以完成这一功能，本节就描述其中一些典型的协议以及它们之间的差异。

无线 Mesh 网络通常采用分布式路由，即网络中的节点分发并采集其他节点的局部路由信息。然后，每个节点根据收集到的网络路由信息，决定到达目的节点的最佳路径。分布式路由协议又可以分为主动式和反应式两种不同的类别。主动式路由协议中，节点周期性的广播自己的存在，并携带自己所知道的局部路由信息；反应式路由协议则在需要发送数据的时候，即时获取路由信息。Mesh 网络的架构和无线介质的特殊性给路由构建带来了一些特殊的挑战。

- 竞争使用共享的无线信道会限制网络的性能。
- 用于网络构建的数据包造成额外的开销。
- 需要引入漫游机制解决移动节点的接入问题。
- 当网络中一个节点失效，可能导致多条路由瞬间失效。

各种不同的协议采用不同的方式解决这些问题，但殊途同归，最终的目标都是最小化网络构建的额外开销，同时保证最大化网络吞吐量、网络的性能，并保持连接的有效性。

### 2.2.1 主要路由技术

如前所述，Mesh 网络中的路由技术可以分为主动式路由和反应式路由。如果路由信息的收集和路由的计算在节点需要发送数据时才进行，则该路由方式成为反应式路由。反之，如果网络的信息分布式存储在网络中的节点中，且每当网络中的状态发生变化，该变化会即时广播全网络，相关的节点即时更新自己的路由信息，这种路由方式称为主动式路由。

大多数 Mesh 路由协议收集信息和判定路由时以如下两种方式为主要判定依据：链路状态和距离向量。

基于链路状态的路由，节点将自己相邻链路信息组织成有向图的形式，洪泛全网。每个节点可以收集到其他节点的局部链路拓扑和质量信息，并基于此构建整个网络的拓扑信息，并基于不同拓扑路由的权重计算出最短路径，即发送数据时的路由。

基于距离向量的路由，节点仅知道目标节点数据需要送达的下一跳节点，即数据发送的方向。而最佳的下一跳节点的选择则基于到达目标节点的总跳数和每一跳的链路质量。距离向量路由方式不需要计算完整的网络拓扑，因此消耗的额外开销更少。缺点是，得到的路由通常不是全局最优的。

分布式路由需要处理网络中的路由环路现象。路由环路通常出现在两个或者更多的节点之间，路由环路会导致数据陷入环路，造成额外的网络开销，且数据始终无法送达最终的目的节点。

### 2.2.2 优化的链路状态路由（OLSR）

优化的链路状态路由（OLSR）广泛的应用于基于嵌入式 Linux 平台的 Mesh 网络中。通常作为守护进程运行在网络层，属于主动式路由，且基于链路状态做路由决策。

在最初的 OLSR 实现中，网络拓扑图的计算很慢且经常在网络状态发生更新的时失效。路由变化频繁，易形成路由环路，造成网络的低可用性。为了解决这些问题，OLSR 引入了信的路由决策参数——传输次数期望（ETX）。新的参数带来了性能的显著提升，但仍然没有解决路由环路的问题。通过增加拓扑控制数据包的发送频率可以一定程度上降低路由环路的形成次数。由此造成的额外的路由开销可以通过限制洪泛距离予以限制——仅向三跳之内的邻居节点洪泛路由变化信息，这种方法在实践中被证明是有效的。这种技术称为鱼眼机制（Fish Eye），该技术保证了 OLSR 的可用性，尽管路由环路还是会偶尔出现。

### 2.2.3 Ad-hoc 网络需求驱动的距离向量路由协议（AODV）

Ad-hoc 网络需求驱动的距离向量路由协议（AODV）是一种基于距离向量的反应式路由协议。在该路由协议中，当有节点需要发送数据到目的节点，就先向网络广播路由请求数据包，通过网络中其他节点包括目的节点的相应，构建瞬时的有效路由。当网络处于相对空闲状态时，该协议最大程度上减少了额外的路由开销。该协议在对能耗要求极高的传感器网络中具有很好的应用价值。

### 2.2.4 针对移动 Ad-hoc 网络的路由协议（BATMAN）

针对移动 Ad-hoc 网络的路由协议 2006 年诞生，最初最为 OLSR 的替代者，属于基于距离向量的主动路由协议。在最初的三个版本中，BATMAN 引入了许多特性，包括：不对称链路，多接口支持等。类似于 OSLR，该协议同样作为用户层的守护进程运行再路由层。

### 2.2.5 BATMAN 升级版（BATMAN-adv）

因为 BATMAN 运行再用户层所带来的性能问题，BATMAN-adv 再 2007 年开始投入研发。因为运行再内核态，新的协议节省了大量的内核态和用户态之间拷贝数据包的开销。另一方面，新的协议运行再链路层，用 mac 地址做路由。

BATMAN-adv 在链路层对数据做封装，对网络层透明，因此可以兼容其他的网络层协议，也使得其他特性得加入更加容易。现在得 BATMAN-adv 支持非 Mesh 设备得桥接和漫游。

2011 年, BATMAN-adv 已经添加进 Linux 内核开发主线树。

## 2.3 802.11 协议簇 QoS 支持

802.11 标准族有对无线网络的 QoS 保障的标准——802.11e。802.11e 将 mac 层数据按照数据的业务类型划分为四个不同的优先级队列, 每一个队列在竞争使用无线信道是具有不同的优先级, 优先级通过竞争窗口大小的设置从而控制竞争成功的概率实现。

## 2.4 无线 Mesh 网络视频传输

本文的主要工作为基于无线 Mesh 网络搭建高性能实时视频流传输系统。该领域已经有过诸多的探索性工作, 本节对相关工作做总结归纳。

工作一 [real-time video surveillance over IEEE802.11 Mesh Network] 中, 作者提出在视频流应用的场景中, 为了在摄像头数量增多时最大限度的保证图像质量, 需要提升网络的高可用性。实验发现, 使用标准 802.11 DCF MAC 协议通讯, 当每个摄像头的视频流占用带宽在 1Mbps 时, 系统最大可负载的摄像头数量大约为 5-6 个。当摄像头超过这个数量时, 就会出现严重的抖动现象从而影响视频质量。文章认为性能的显著下降来自于多跳场景下隐终端的影响。针对这一问题, 文章提出了一种时间同步的应用层 MAC 协议—TSAM, 该协议运行在 802.11 之上。TSAM 禁用了 802.11 的冲突退避机制, 并基于时分复用技术给每一个节点分配时间窗口, 从而消除了竞争, 保证无线信道的最大可用性。实验显示, TSAM 在控制端到端延时的同时通过顺序时间窗口保证了节点之间的同步。

该工作对节点设备的时钟同步要求较高, 且需要修改现有 802.11 协议的冲突退避机制, 不能够很好的兼容协议。

工作二 [Video-aware Multicast Opportunistic Routing over 802.11 two-hop mesh networks] 提出并特征化了一种针对视频流多播的机会路由算法, 该算法特别适用于两跳之内的无线 Mesh 网络。文章通过分类不同的视频数据并赋予不同的权重, 从而提升 QoS。对于视频流数据而言, 延时是一个重要的考量的指标, 相比之下, 即使因此发生一定的丢包都可以接受。基于此, 文章提出 ViMOR, 一种视频流多播机会路由协议, 且聚焦于跳数小于等于两跳的拓扑结构。相比于 MORE, ViMOR 能够提升网络的吞吐量同时提升视频接受的质量。

工作三 [Video Multicast over Wireless Mesh Networks with Scalable Video Coding (SVC)] 中, 作者提出了一种挑选对等节点参数—MSM (Multiplication Selector Metric)。该参数可以解决传统的基于假发的参数面临的两个局限: 瓶颈链路的识

别和跳数计数。再此基础上，文章提出了一种基于无线链路质量感知的对等节点选择机制—WLO (Wireless Link quality- aware Overlay)。WLO 根据 MSM 参数的值在存有目标内容的对等网络节点中选择最优的节点。

## 2.5 其它例子

在第1章中我们学习了贝叶斯公式 (1-13)，这里我们复习一下：

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (2-1)$$

### 2.5.1 绘图

本模板不再预先装载任何绘图包（如 `pstricks`，`pgf` 等），完全由用户来决定。个人觉得 `pgf` 不错，不依赖于 Postscript。此外还有很多针对  $\text{\LaTeX}$  的 GUI 作图工具，如 XFig(jFig), WinFig, Tpx, Ipe, Dia, Inkscape, LaTeXPiX, jPicEdt, jaxdraw 等等。

### 2.5.2 插图

强烈推荐《 $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  插图指南》！关于子图形的使用细节请参看 `subcaption` 宏包的说明文档。

#### 2.5.2.1 一个图形

一般图形都是处在浮动环境中。之所以称为浮动是指最终排版效果图形的位置不一定与源文件中的位置对应<sup>①</sup>，这也是刚使用  $\text{\LaTeX}$  同学可能遇到的问题。如果要强制固定浮动图形的位置，请使用 `float` 宏包，它提供了 `[H]` 参数，比如图 2.1。



图 2.1 利用 Xfig 制图

大学之道，在明明德，在亲民，在止于至善。知止而后有定；定而后能静；静而后能安；安而后能虑；虑而后能得。物有本末，事有终始。知所先后，则近道矣。古之欲明明德于天下者，先治其国；欲治其国者，先齐其家；欲齐其家者，先

<sup>①</sup> This is not a bug, but a feature of  $\text{\LaTeX}$ !

修其身；欲修其身者，先正其心；欲正其心者，先诚其意；欲诚其意者，先致其知；致知在格物。物格而后知至；知至而后意诚；意诚而后心正；心正而后身修；身修而后家齐；家齐而后国治；国治而后天下平。自天子以至于庶人，壹是皆以修身为本。其本乱而未治者否矣。其所厚者薄，而其所薄者厚，未之有也！

——《大学》

### 2.5.2.2 多个图形

如果多个图形相互独立，并不共用一个图形计数器，那么用 `minipage` 或者 `parbox` 就可以。否则，请参看图 2.2，它包含两个小图，分别是图 2.2(a)和图 2.2(b)。推荐使用 `\subcaptionbox`，因为可以像图 2.2 那样对齐子图的标题，也可以使用 `subcaption` 宏包的 `\subcaption`（放在 `minipage` 中，用法同 `\caption`）或是 `subfigure`、`subtable` 环境，像图 2.3，不要再用 `\subfloat`、`\subfigure` 和 `\subtable`。



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。如果标题很长的话，它会自动换行

图 2.2 包含子图形的大图形 (`subcaptionbox` 示例)



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。`subfigure` 中同一行的子图在顶端对齐。

图 2.3 包含子图形的大图形 (`subfigure` 示例)

古之学者必有师。师者，所以传道受业解惑也。人非生而知之者，孰能无惑？惑而不从师，其为惑也，终不解矣。生乎吾前，其闻道也固先乎吾，吾从而师之；生乎吾後，其闻道也亦先乎吾，吾从而师之。吾师道也，夫庸知其年之先後生於吾乎！是故无贵无贱无长无少，道之所存，师之所存也。





图 2.4 并排第一个图



图 2.5 并排第二个图

嗟乎！师道之不传也久矣，欲人之无惑也难矣。古之圣人，其出人也远矣，犹且从师而问焉；今之众人，其下圣人也亦远矣，而耻学於师。是故圣益圣，愚益愚。圣人之所以为圣，愚人之所以为愚，其皆出於此乎？爱其子，择师而教之，於其身也，则耻师焉，惑焉。彼童子之师，授之书而习其句读者，非吾所谓传其道、解其惑者也。句读之不知，惑之不解，或师焉，或不焉，小学而大遗，吾未见其明也。巫医、乐师、百工之人不耻相师，士大夫之族曰“师”曰“弟子”之云者，则群聚而笑之。问之，则曰：彼与彼年相若也，道相似也，位卑则足羞，官盛则近谀。呜呼！师道之不复，可知矣。巫医、乐师、百工之人。吾子不齿，今其智乃反不能及，其可怪也欤！圣人无常师。孔子师郯子、苌子、师襄、老聃。郯子之徒，其贤不及孔子。孔子曰：“三人行，必有我师。”是故弟子不必不如师，师不必贤於弟子。闻道有先後，术业有专攻，如是而已。

如果要把编号的两个图形并排，那么小页就非常有用：

李氏子蟠，年十七，好古文、六艺，经传皆通习之，不拘於时，学於余。余嘉其能行古道，作师说以贻之。

——韩愈（唐）

## 第3章 项目设计

### 3.1 项目描述

本项目旨在构建一整套稳定、健壮、大规模的无线 Mesh 网络基础设施，以支持大量的实时监控视频数据传输。

项目基于的硬件平台为 mikrotik RB411U 电路板，该电路板搭载 Athros AR7130 处理器，工作频率 300MHz, 内存 32M，天线为 Broadcom，工作在 5GHz 频段，增益 12dBi。该硬件平台正常通信范围为 3 ~ 5km。另外，配置 Atheros AR9220 无线模块，该模块对 EDCA 的队列机制提供硬件级支持。节点另外设计有封装外壳，防水防爆，以适应不同的工业应用场景。

节点运行的操作系统为 openWRT 系统。基于 Linux2.4.30 内核，专业设计用于嵌入式无线网络设备。开发系统为 Ubuntu12.04，编译工具基于 openWRT 提供的相应硬件平台的编译环境配置，引入 BATMAN-adv 路由协议的包。所有使用的软件系统均来自开源项目。

### 3.2 BATMAN-adv 路由协议

为了深入研究项目的 Mesh 网路特点，并进行深度开发，有必要首先理解 BATMAN-adv 的技术原理。BATMAN-adv 协议支持 Mesh 网络的自组网和数据路由两大核心功能。

#### 3.2.1 数据包类型

BATMAN-adv 协议定义了六种不同的数据包类型，用于网络的路由构建、数据包传输以及网络拓扑可视化。网络中的节点称为 Originator。这里首先对每一种数据包类型做描述。

**Originator Messages** 通常简称为 OGMs，为 BATMAN-adv 协议的核心数据包。它用于发现网络中的节点，每个节点通过周期性的广播 OGMs 声明自己的存在，以加入网络。[图] 节点广播 OGMs，邻居节点接收到后重广播出去，这样两个相互无法直接沟通的节点就能够知道彼此的存在，从而构建多跳网络。

OGMs 的存在主要服务于两个目的：1) 申明节点的存在，以及到达申明节点的可能的下一跳节点。2) 测量链路的质量，通过多跳重广播积累路径的整体质量。后续会详细描述。OGM 包中包含如下信息：

- **Originator** 地址—用于鉴别生成该 OGM 的原始节点。
- 序列号—用于链路质量度量和重复包检测。
- 传输质量 (TQ)—描述到达 **Originator** 的整条路径的链路质量。
- 前驱节点地址—用于检测并丢弃以广播出去的 OGM。
- **TTL** —用于限制 OGM 的最大传输跳数。
- 网关标识—用于标识接入外网的节点。

**Internet Control Message Packet** 简称 **ICMP**，用以支持一部分由 IP 版本的 **ICMP** 提供的特征。因为 **BATMAN-adv** 运行在 **mac** 层，因此网络中的节点不能够通过 IP 地址到达，因此协议提供了 **mac** 地址到 **ip** 地址的映射机制，并基于此设计了 **mac** 地址版本的 **ping** 工具。

**Unicast Packet** 单播数据包封装来自上层的单播数据。除了上层数据本身，单播包还在包头中添加目的地址和 **TTL** 字段。

**Fragmented Unicast Packet** 碎片化单播数据包。**BATMAN-adv** 封装来自上层的数据，可能超出 **mac** 层 **MTU** 长度的限制，这就导致数据包需要被碎片化并在终点重新聚合。碎片化单播数据包除了分拆的数据外，还需要在包头添加序号用以聚合，并添加 **originator** 的标识和碎片末尾标识。

**Broadcast packet** 广播包用于向全网所有节点广播数据。除了数据部分，包头还包含序列号，源节点地址和 **TTL**。

**Visualization packets** 可视化数据包用于支持动态的图形化网络拓扑。用户需要先设定其中一个节点为服务器，服务器节点会向网络中其他节点发送可视化数据包，搜集其他节点的信息，从而构建出整体网络的拓扑图。

### 3.2.2 节点发现

如前所述，**BATMAN-adv** 协议中所有节点会周期性的向其他节点广播 **OGMs**，当一个节点接收到 **OGM** 后，会做如下处理：

1. 检查该 **OGM** 包中的 **originator** 是否为自身，如果是，则发送者为直接邻居，路由表做相应更新。
2. 检查该 **OGM** 包的前一跳发送节点是否为自身，如果是，表示该 **OGM** 已经处理过，直接丢弃。
3. 检查 **originator** 是否已经在路由表中存在，如果否，创建该路由表项。
4. 更新到达 **originator** 的路由表项。
5. 更新 **TQ** 和 **TTL** 值，重广播该 **OGM**。

在此基础上，还会对路由循环和重复 **OGM** 做检查。

### 3.2.3 链路质量估计

TQ 值是用以估算链路质量的核心度量值，在 OGM 的传输过程中，TQ 值逐跳计算并累计。TQ 值实际上描述了数据包在该链路上按预期到达的概率。该值存储为一个 8 位的值，大小位 0-255。

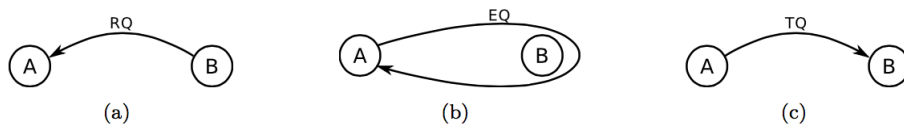


图 3.1 计算 TQ

**接收质量**定义为 RQ。如图 3.1，节点 B 发送 OGM 并被节点 A 接收到，A 点根据来自 B 的 OGM 序列号计算从 B 到达 A 的单向链路 RQ。该过程通过一个大小为 N 的滑动窗口（默认大小 128）实现，在该滑动窗口中将纪录从最后接收到的 OGM 的序列号向前推 N 个对应的 OGM。RQ 值即为滑动窗口内序列号对应的 OGM 中实际接收到的比例。

**回程质量**定义为 EQ。节点 A 发出的 OGM 到达 B 后，B 会重广播该 OGM，A 在此收到该 OGM 即可计算链路的回程质量。计算类同 RQ，同样通过一个纪录序列号的滑动窗口实现。

**传输质量**定义位 TQ。传输质量指代数据包从节点 A 发出，被节点 B 正确接收的概率。因为 EQ 定义为数据包双向回程正确接收的概率，RQ 定义为链路反向的正确接收概率，由此即可计算 A 点到 B 点的链路传输质量 TQ：

$$\begin{aligned} EQ &= RQ * TQ \\ TQ &= \frac{EQ}{RQ} \end{aligned} \tag{3-1}$$

### 3.2.4 TQ 传播

网络中的节点从 OGM 中可以获得前一跳节点到达目的节点的 TQ 值。如图 3.2所示，A 点发出 OGM，该 OGM 传播途径的每一个节点根据 OGM 中纪录的全局 TQ 值，结合自身邻居表存储的本地 TQ 值，更新自身到达 A 点的 TQ 值，并将 OGM 中的 TQ 值同步更新，之后重广播该 OGM。

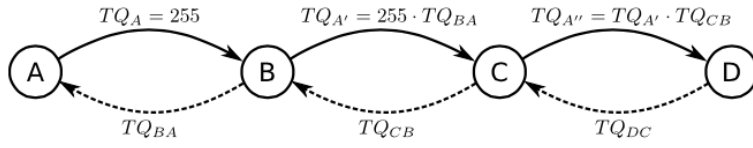


图 3.2 TQ 传播

如果节点 A 发出的 OGM 通过两条不同的路径到达某一节点，接收节点分别计算两条路径的全局 TQ 值，并选择链路质量更好的那一条作为最优路由路径。没经过一次节点重广播，OGM 中的全局 TQ 值会加上一个惩罚值，这一实现使协议在选择时更佳倾向于选择跳数更少的路由，全局来讲，这有利于优化信道资源的竞争。

### 3.2.5 路由选择

不同于很多其他协议计算整个网络的拓扑，存储到达目的节点的整条路由，BATMAN-adv 仅存储到达目的节点的最优下一跳节点。下一跳节点收到该数据包后，会继续寻找最优下一跳发送。

图 3.3 给出了一个路由决策的场景示例。节点 F 发送一个数据包到节点 A。节点 F 所知道的信息仅为到达节点 A 有两条有效路径，两条路径分别对应两个不同的 TQ 值。此时，如果途经 D 的路径 TQ 值更高，则 F 选择将数据包交给 D。D 点经过同样的决策过程，将数据包交给 C，最终由 C 完成最后一跳传输。

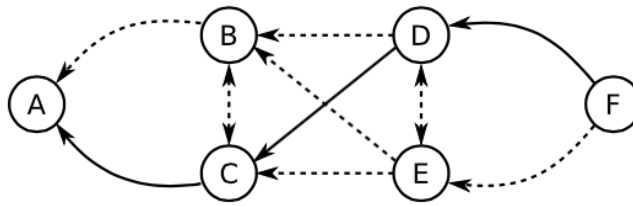


图 3.3 路由选择示例

## 3.3 全局 QoS 保障技术

本项目的主要目标是在视频传输 Mesh 网络中提供 QoS 保障，保证在不同场景下，用户能够接收到流畅的视频流数据。在第二章相关工作中已经介绍了目前该领域的相关工作的研究现状，这些工作或多或少存在大规模应用的弊端。因此本文基于全面详尽的实验，提出了一套优化整体视频传输 Mesh 网络 QoS 的技术方案。整个方案分为如下三项核心技术：

### 3.3.1 划分子网

无线网络中核心的技术挑战在于无线信道的开放性，这就意味着当多个设备需要发送数据时，同一时刻只能有一个设备有效传输。虽然现在有诸如 OFDM [参考]、MIMO [参考] 等技术来应对这一问题，但目前市面上的硬件产品并不都能够很好的支持这些技术，因此不具有普适性。子网划分即将整个大的 Mesh 网络划分为多个子网，相邻子网间采用相互正交的信道，从而降低节点间相互信道竞争造成的干扰。整体上提升网络的吞吐量。

### 3.3.2 视频帧权重队列映射

该方法引入 802.11 协议簇的 QoS 保障技术，该技术在系列标准的 802.11e [参考] 子标准中规定。其核心在于将应用层业务数据映射到不同的 mac 层优先队列，不同的优先队列有不同的信道接入优先级，从而保障重要的对时延敏感的数据尽快获取信道传输。

### 3.3.3 移动场景下的 QoS 保障

在移动场景下，无线 Mesh 网络的组网协议会面临更加严峻的挑战，尤其是高速移动的场景下，batman-adv 协议的路由切换机制存在缺陷，后面的章节将通过深入细致的实验验证，并提出有效的解决方案。

## 3.4 辅助模块开发

上述协议可以在大多数场景中提供稳定可靠的路由功能，但是针对不同的需求仍然存在很多优化的空间。为了深入的探索协议的运行机制、不同参数的影响，需要深入协议源码进行实验探究。另外，本项目旨在搭建实际运行的系统，因此所有实验均在实际的设备上运行测量。为此，开发了手动设定固定路由工具、外接显示模块装置等功能模块。

**手动设定固定路由**提供给 Mesh 网络管理员手动设定固定路由的工具，包括命令行即时交互接口。这个工具可以很大程度上提升实验和网络设定的自由度。在实验中，Mesh 网络可能根据协议形成固定的拓扑结构，一旦产生外界的数据压力，拓扑结构就会变化，我们很难进行一些压力测试，比如切换条件等一些临界状态的测试。另外在实际部署中，手动设定部分稳定链路的路由可以保障整体网络拓扑的稳定，避免因为一些链路的抖动，造成整个网络拓扑变化频繁，影响性能。

**外接显示模块**提供 rssi 轮询显示和带宽测试两项功能。正常模式下，轮询的显示邻居节点的 rssi 值，当用户需要测量到达子网簇首的带宽时进行模式切换即可

实时测量。

[图] 该模块通过硬件和软件两部分配合实现。硬件部分采用单片机加数码管，并集成 USB 接口，通过 USB 接口直接连接到 Mesh 主板。软件部分在 Mesh 主板运行一个后台 shell 进程检测 USB 口输入信号。正常模式下，后台进程周期性的通过 iwlist 命令扫描周围邻居节点的 rssi 值。当用户需要测试部署位置到达子网簇首的有效带宽时，通过按测试按键，硬件模块会通过 USB 接口通知后台进程进行带宽测试，然后返回测量数值显示在数码管上。

## 第 4 章 项目实施

本章详细介绍项目系统的实现，尤其集中于介绍项目的三项创新性贡献：子网划分、视频帧权重队列映射、移动场景下的 QoS 保障。这三项核心工作源自于在详尽的实验探索和对代码的深入分析中发现漏洞和不足。

### 4.1 信道隔离

项目所选择的硬件平台支持单一无线接口, 这就意味着每一个节点设备只能工作在一个无线信道。因为信道竞争和隐终端的影响, 如果所有节点选择同一信道则会造成严重的信道干扰, 导致网络总体吞吐量的急剧下降。为了验证信道竞争的影响, 我们做了如下几组实验。

#### 4.1.1 相邻链路干扰

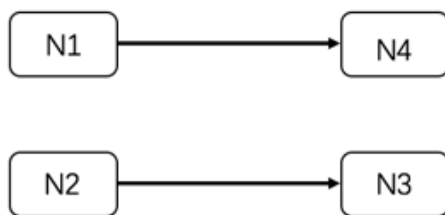


图 4.1 相邻链路干扰实验图示

首先是相邻链路的信道竞争。图 4.1给出了实验图示, 节点 1 和节点 3 之间通信的同时节点 2 和节点 4 通信, 产生信道竞争, 导致每条链路的实际有效带宽下降。实验结果如下表 4.1所示。

表 4.1 相邻链路干扰实验结果

发送功率	信道 (L1-L2)	L1 实际带宽 (Mbps)	L2 实际带宽 (Mbps)	L1 并发实际带宽 (Mbps)	L2 并发实际带宽 (Mbps)
27	149-153	54.2	54	29.1	27.2
8	149-153	54.1	54.2	27.8	29.1
6	149-153	52.5	54.7	27.5	30
5	149-153	54.3	54.2	29.4	28.4
2	149-153	43.9	46.1	30.5	32.1



可以明显看出当两条相邻链路同时发送数据时，各自的吞吐量降为原先的一半左右，当相邻的并发链路数量过多时即可能导致每条链路的实际吞吐不足以支持视频流传输。

### 4.1.2 隐终端

隐终端指当网络中存在多个终端时，某终端只能在信道竞争时获知相邻终端的存在，而无法感知其他更远处终端的存在，处于远处的未被感知的终端即称为隐终端。当某终端侦听信道判断当前信道空闲时，就会发送数据，但可能与此同时远处的隐终端也认为信道空闲并发送数据，假设此时两份数据的接收者处于两者的物理位置的中间，则两份数据同时到达将造成混乱，无法分辨，从而无法应答。导致两边的终端不得不反复的重传，甚至发生数据包丢失。以下实验就是探究隐终端在 Mesh 网络中的影响。

首先进行单跳实验，网络拓扑如图 4.2。客户端连接 N1 节点，服务端连接 N5 节点，图中共计 5 个节点组成一个稳定的无线 Mesh 网络。

在客户端和服务端之间，通过 Mesh 网络进行 100 次测试。每次测试运行 20 秒，客户端上的发送进程分别以 1 至 100 间隔 1Mbps 的发送带宽向服务端发送 UDP 数据包。每次测量结束，服务端上的服务进程会统计客户端此次通信数据的有效带宽、时延抖动等数据并告知客户端进程。所有测量结果在客户端汇总整理。

然后进行隐终端存在的实验，网络拓扑如图 4.3。客户端机器通过交换机与 Mesh 网络中的 N1 节点和 N5 节点连接，服务端机器与 Mesh 网络中的 N3 节点相连，在该网络中，N1 节点和 N5 节点互相不在覆盖范围内，不知道对方的存在。在客户端和服务端之间，客户端虚拟两个进程，利用 Iperf 工具并控制 N1 节点和 N5 节点并发向 N3 节点发送数据，调节发射功率从 500 次依次增大到 1700，每次通过 Mesh 网络进行 100 次测试。每次测试进行 20 秒，客户端上的两个进程分别以 1 到 100 间隔 1Mbps 的发送带宽向服务端发送 UDP 数据包。每次测量结束，服务端的进程统计客户端进程此次通信数据的有效带宽等数据并告知客户端进程。所有测量结果在客户端汇总整理。以上实验过程在 N1 节点和 N5 节点 RTS/CTS 打开与关闭的情况下分别进行依次。

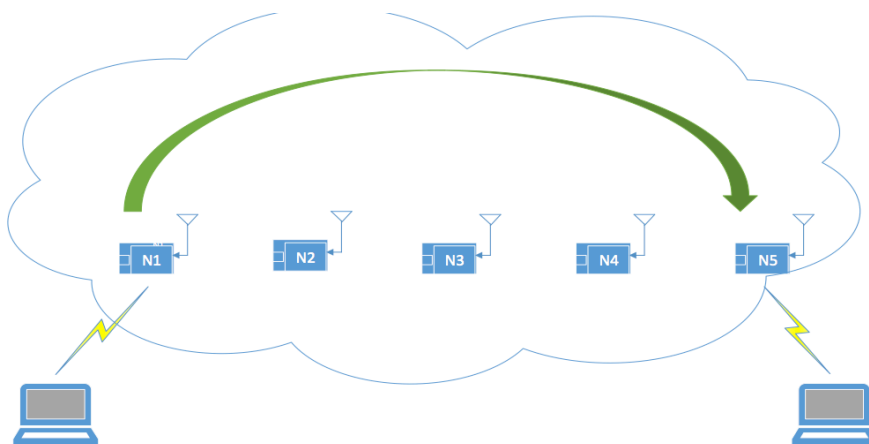


图 4.2 单跳带宽测试

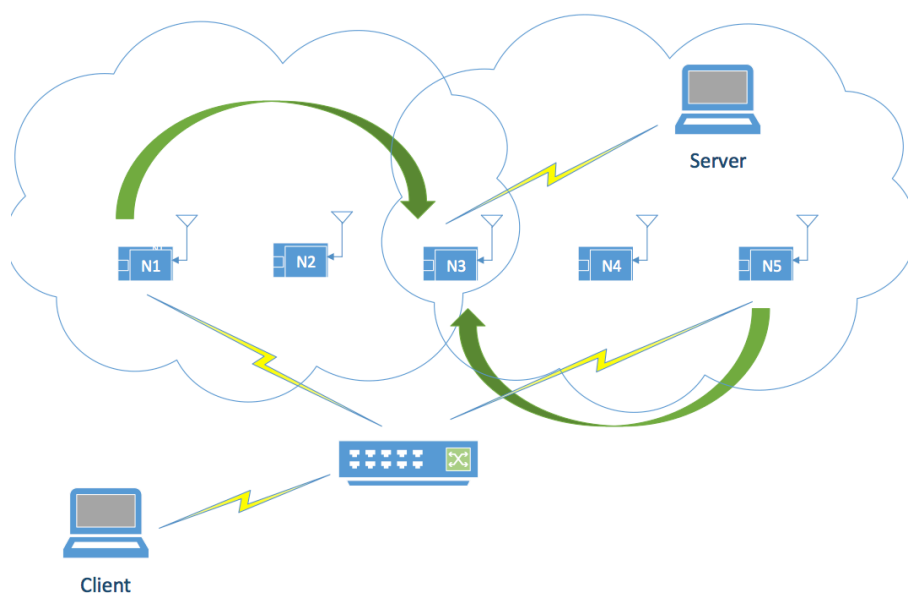


图 4.3 隐终端带宽测试

单跳带宽测试实验结果如图 4.4 所示，可以看到在无干扰情况下，硬件平台支持的最大带宽接近 100Mbps。

相较之下，隐终端存在的带宽测试实验结果如图 4.5 所示，该图示中同时呈现了 RTS/CTS 打开和关闭情况下实际有效带宽。可以明显看出 RTS/CTS 打开情况，实际有效带宽提升在 10Mbps 至 20Mbps。但考虑到 RTS/CTS 打开，因为需要发送 RTS/CTS 控制帧，所以会造成一定程度上的额外资源开销。

进一步引入发送功率作为因变量。之所以考虑发送功率，是因为发送功率和干扰范围密切相关，当发送功率升高时，其干扰范围就会扩大，从而导致网络整体吞吐量下降。反之，发送功率过小，则会导致网络形成更多的多跳路由，而每多一跳同样会带来额外的干扰。依次我们对发送功率同样进行了细致的实验辅助建模，

探索其和有效带宽的关系。

实验结果如图 4.6 所示，可以发现当发送带宽较小，即使较小的发送功率也可以满足要求。但当发送带宽超过 50Mbps 后，发送功率就会成为限制有效带宽的一个重要因素，随着发送功率进一步增大，有效带宽逐渐达到饱和。

综合发送带宽和发送功率绘制图 4.7。可以看到 RTS/CTS 打开的情况下，有效带宽呈现出更好的状态。因此在实际项目系统的测试和部署中，如不特殊说明，将选择打开 RTS/CTS 功能。

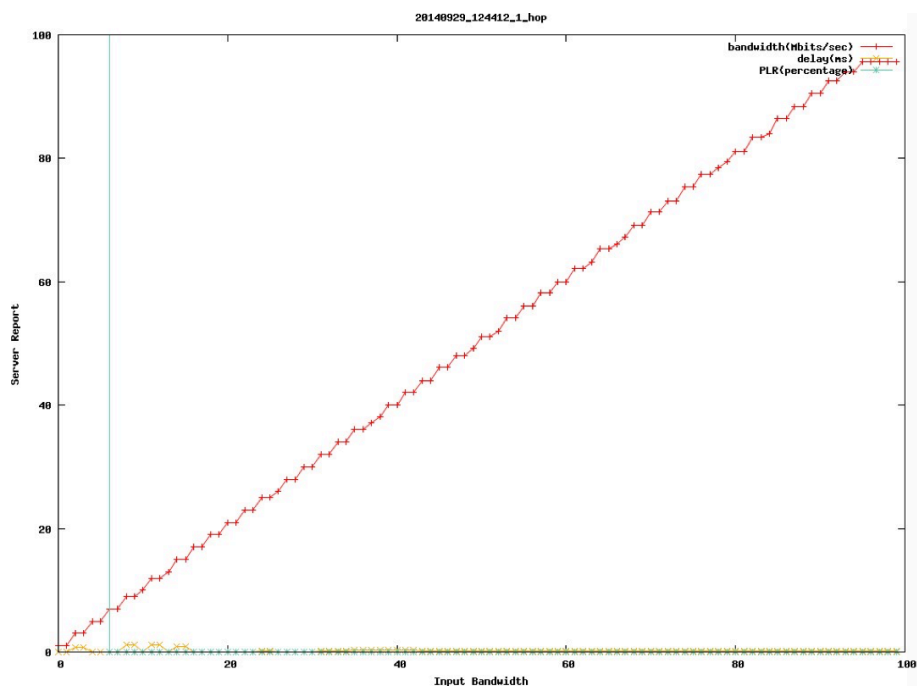


图 4.4 单跳带宽测试实验结果

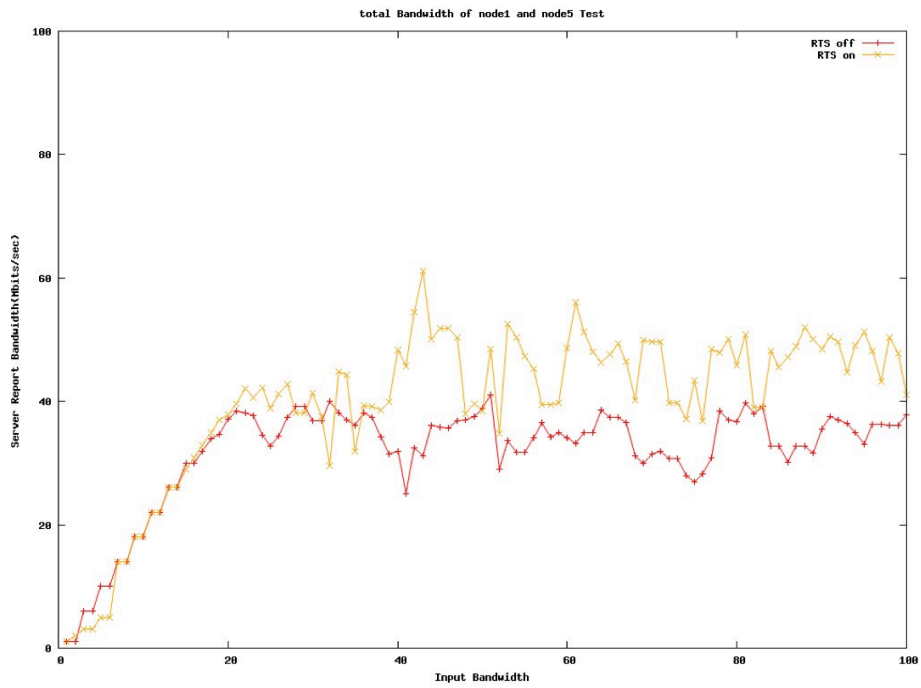


图 4.5 隐终端带宽测试实验结果 (rts 打开 vsrts 关闭)

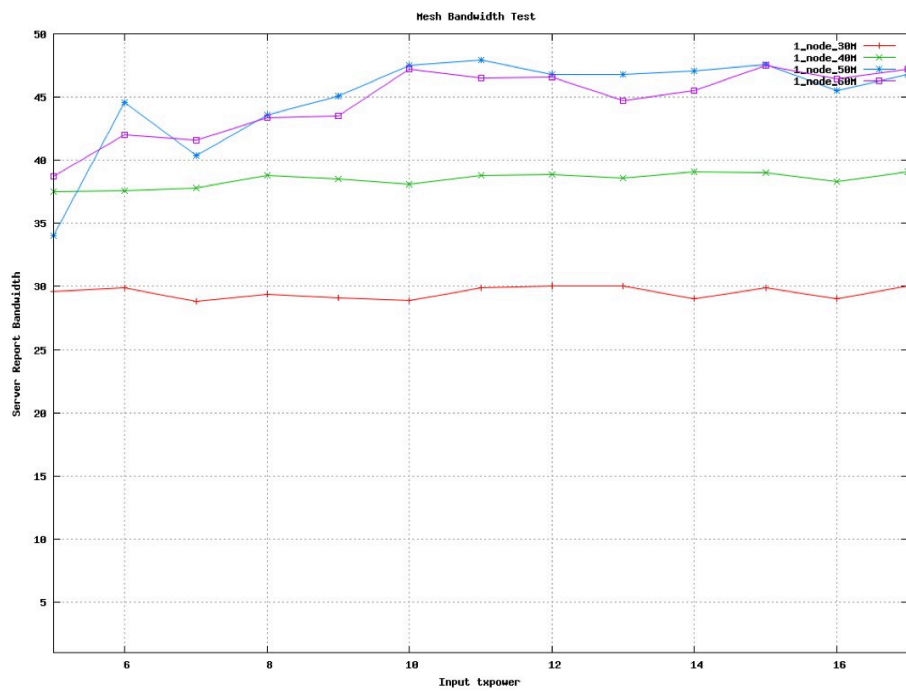


图 4.6 发送功率对带宽影响

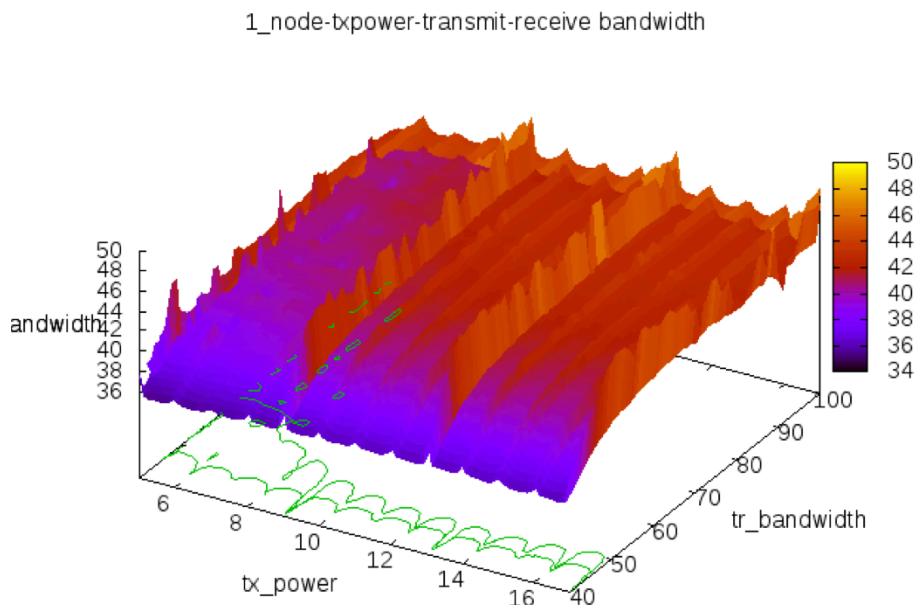


图 4.7 隐终端带宽测试实验结果 (增加发送功率作为因变量)

由上述实验可以看出相邻链路干扰和隐终端的存在会给 Mesh 网络的实际有效带宽带来很大的干扰。因此在进行总体网络规划的时候,选择进行子网划分,子网内部工作在同一信道,子网之间采用正交信道,避免相互干扰。

5GHz 在高频段有 10 个可用信道(根据所在国家和地区有差异)。设置 20Mbps 的信道宽度,则可以划分为 5 个互相正交的独立信道。根据四色定理,平面空间中的区块可以用四种颜色着色,相邻区块不会出现重色。据此,我们将整个网络划分为多个相邻的子网。子网内部独立自组织形成 Mesh 网络,每个子网选择一个节点作为簇首节点,簇首节点作为该子网联通外部的网络的网关。上层簇首节点因为数量可控,我们通过桥接形式接入远距离定向无线传输设备。这样最终的网络架构将是一种两层结构。该结构既保留了 Mesh 网络的独特优势,又进一步通过分层分信道划分子网,到达隔离干扰域,优化整体网络吞吐量的目的。

划分子网的另一个好处是,在我们的系统目标场景中,油田是一个重要的应用场景,而在野外的油田分布十分分散,一套 Mesh 网络形成大范围覆盖效果并不理想,并且会需要大量的中继节点,造成严重的资源浪费。为此我们可以在每一个油田或相邻的几个油田部署独立的一套 Mesh 子网,完成对该油田区域的覆盖,可以提供充足的带宽用于监控、生产数据的传输。最终通过簇首桥接远距离定向无线设备完成数据汇总至油田的控制中心。如 [图] 所示。

基于以上实验论证,我们搭建了较大型的室内实验平台,使用 3.1 节中介绍的硬件平台配置了 101 个 Mesh 节点。将这 101 个节点划分为 10 个 Mesh 子网,每个 Mesh 子网的簇首桥接一个远距离无线设备,无线设备与 sink 直接通信。实验平台

如图 4.8 所示。因为原硬件平台天线信号覆盖范围最大可达  $3 \sim 5\text{km}$ ，显然会造成整个实验床的全覆盖，形成严重的节点之间的干扰，实验验证在这种情况下视频完全无法传输。于是我们给天线加装衰减器，通过调节衰减器的衰减性能将天线信号覆盖范围控制在三米左右。这样可以基本保证划分的子网做到一定的区分。

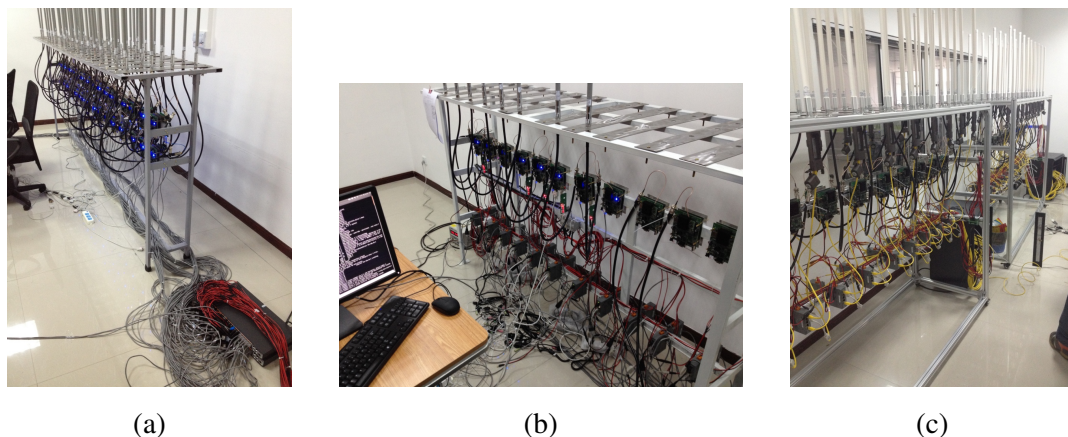


图 4.8 子网划分实验床

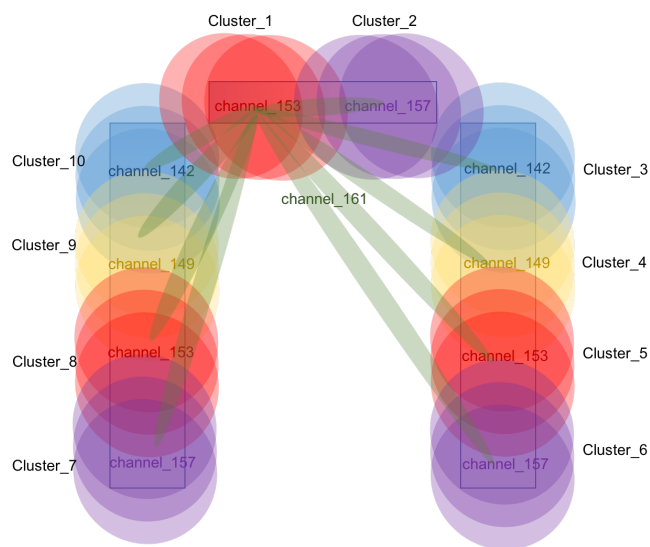


图 4.9 子网划分后的干扰示意图

实验床的节点物理位置分布成如图 4.9 所示，图中每种颜色代表一个独立的信道，相互正交，相邻信道间隔知道为两个独立信道，因此不存在干扰。图中蓝、黄、红、紫分别代表  $5\text{GHz}$  频段的 142、149、153、157 号信道，这四个信道用于分配给子网，根据四色定理，存在这样的方案使得任意相邻信道之间不存在干扰。因为不同子网间节点在不信道，互相之间不可见，因此组网协议在不同子网间也是不可组网的，这样就实现了子网的隔离，而子网内部可以自由组网。

这样的子网是相互独立的，而我们最终需要的是一个整体的网路，因此我们使用两层架构，在子网之上，每个子网的簇首节点桥接一个上层节点，该节点采用定向发送方式，因此虽然需要更高的传输功率但干扰范围可控，且独立占据一个与所有子网都不相互干扰的信道。

完成配置部署后我们进行了实验验证，该方案带来的性能提升十分巨大，如表 4.2 所示。实验比较了不同的信道划分方案，主要分两类，一种是所有节点均采用同一信道，全干扰状态下进行视频传输实验，另一种是上述子网划分方案。在第一种单一信道实验中，用三种不同且相互正交的信道分别进行，以排除环境种可能的信号干扰。在每个子网中接入 3 路视频，一共 30 路视频，每一路视频占用传输带宽设置为 2Mbps。实验结果以实际视频的传输质量为参照。

从表 4.2 中显而易见，子网划分方案带来的性能提升是显著的，单一信道在这样的全干扰状态下几乎无法正常工作。

表 4.2 子网划分性能提升对比

信道方案	实际效果
单一信道方案 (142 信道)	簇 1 内三路视频可见，簇 2、簇 3 各一路视频可见
单一信道方案 (149 信道)	仅簇 1 内一路视频可见
单一信道方案 (153 信道)	仅簇 1 内一路视频可见，其他簇偶尔出现断断续续的视频
子网划分方案	所有视频均可见，偶尔会出现部分卡顿现象

## 4.2 视频帧权重队列映射

在过去的二十多年中，无线局域网中的视频流传输研究吸引了大量的研究人员的努力，其中很多的工作都聚焦在 QoS 管理方面。比如，802.11e 定义的 EDCA，在 mac 层实现了不同的权重队列，每个队列对应不同的发送优先级，上层过来的业务数据根据类型被映射到不同的权重队列中。视频和音频数据通常具有更高的机会进入高优先级的发送队列。依次，相对于传统的 802.11 的信道竞争机制，EDCA 的支持下，视频音频数据将获得刚好的传输带宽，从而带来更好的用户体验。

另一方面，视频帧编码技术将视频编码为不同权重的帧，权重更高的帧对于视频的解析更重要，甚至仅有高权重帧的情况下，也可以解码出流畅但不甚清晰的视频。由此，将视频帧解码为不同权重的帧映射到不同的 EDCA 权重队列中，就可以实现在带宽资源过度匮乏的情况下，优先传输高权重视频帧的目的。

目前，一些研究工作已经将这一想法引入了无线 Mesh 网络，但是并没有取得显著的效果。特别是在网络规模扩大或者视频数据量增大的情况下，带宽很容



易耗尽 [Iptvhomenetworkingvia802.11 wireless mesh networks: an implementation experience]。其他研究工作提出网络中的在线视频数据削减 [W 4: Real-time surveillance of people and their activities]。但是, 计算机视觉技术会需要很大的资源开销, 这对计算资源受限的 mesh 节点是一个极大的挑战。另一方面, 相关工作大多数都是通过仿真软件来完成, 缺少实际系统的验证。

通过细致的实验分析, 我们发现现阶段很多工作提出的映射机制和入队算法越来越复杂化, 能够优化的空间越发有限。一个可能的性能突破的方向是对数据进行更加细粒度的分析。例如对于视频数据帧, 不仅仅停留在编码帧的层面, 而是深入观察相同的编码帧之间的差异, 达到更好的映射效果。该想法基于我们实验中的三点发现:

1. 属于同一类型的编码帧在解码过程中的权重不同。典型的视频帧编码标准比如 H.264 和 MPEG-4 将视频帧编码为三种不同类型的帧, 分别是 I 帧、P 帧和 B 帧。实验发现, 属于同一个组的 P 帧权重依次递减, B 帧也呈现同样的规律。
2. 因为同一个编码帧可能在网络层或者更低层被分割为不同的数据包, 这些数据包同样会呈现不同的重要性。因此, 在设计映射机制的时候, 应该深入不同该层次的数据包, 而不是停留在编码帧的层面。
3. 映射机制应该具有足够的灵活性, 使不同类型的编码帧都有机会使用高权重的发送队列, 最大限度的利用有限的带宽。

基于以上, 本项目提出一种无线 Mesh 网络视频帧的 mac 层权重队列映射机制, 全面的考虑了编码帧类型、帧出现的位置、更细粒度的数据包形成最终的映射方案。该方案在高效的网络传输和有限的节点计算资源之间做到很好的平衡。

#### 4.2.1 视频帧分层编码

视频数据一直是数据量最大的业务数据类型, 再如今大数据火热的阶段, 尤其被关注, 在无线网络中视频数据同样也给网络传输带来了极大的挑战。不同的视频编码技术应运而生, 在这之中, H.264 和 MPEG-4 被业界广泛接收和使用。这种类型的编码方式在性能和编码复杂度上都能够很好的满足大多数的应用场景。

分成编码技术将视频编码为三种不同类型的帧: I 帧、P 帧、B 帧。每一种帧在视频解码时都扮演不同的角色。

- I 帧 (帧间编码): 该帧数量最少, 包含全部用来解码其自身的信息, 这就以为这 I 帧的解码不需要依赖其他 I 帧或者 P 帧、B 帧。I 帧通常压缩为一个静态图像, 体态也较 P 帧、B 帧更大。



- **P 帧 (前向预测帧):** 该帧包含它之前最近的 I 帧和 P 帧之间的差异, 因此需要依赖之前的 I 帧和 P 帧来解码。
- **B 帧 (双向预测帧):** 该帧压缩尺度最大, 需要依赖其之前和之后的 I 帧和 P 帧来解码。

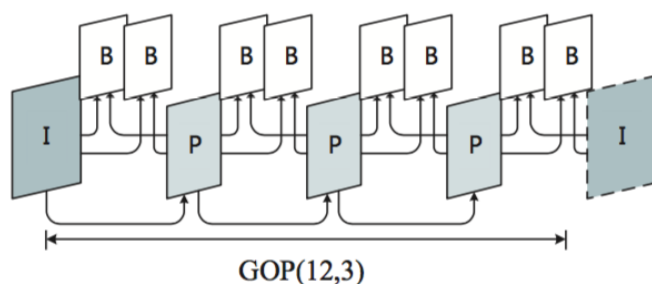


图 4.10 GOP 结构示例, GOP(12,3)

根据 H.264 和 MPEG-4 编码, 一小段视频会被解析编码为一组重新组织过的帧, 这一组帧称为 GOP。每个 GOP 总是由一个 I 帧开始, 之后跟随一段连续的 P 帧和 B 帧。GOP 的结构可以表示为两个参数  $G(N,M)$ , 其中  $N$  表示 GOP 中包含的所有帧的数量 (两个连续 I 帧之间的距离),  $M$  表示 I 帧和其后第一个 P 帧之间 (或者两个连续 P 帧之间) 的距离。图 4.10 为  $G(12, 3)$  的结构示例, 分解后即为: ‘IBBPBBPBBPBB’。

如图 4.10 所示, GOP 内部的不同帧之间紧密相连, 不同的 GOP 之间相互独立。实质上, I 帧不依赖于任何其他帧, 可以单独解码, P 帧依赖于其之前的 I 帧或者 P 帧, B 帧依赖于其前后的 I 帧或者 P 帧。也就是说, 如果在传输过程中, 丢失了 I 帧则整个 GOP 都无法解析。类似的如果一个 P 帧丢失, 则其后的 P 帧和 B 帧均无法解码。而 B 帧丢失仅影响其自身, 其他数据帧不会收到任何影响。由此我们可以总结三种类型帧的重要性, 显然 I 帧 > P 帧 > B 帧。

综上, 处于 QoS 保障的考虑, 当带宽紧缺时, 需要保证重要性更高的帧优先传输。

#### 4.2.2 802.11e 增强分布式协调访问 (EDCA)

传统的 IEEE802.11 标准分布式信道接入协调功能 (DCA) 最为基础的信道接入方式, 该方式基于 CSMA/CA, 不提供 QoS 保障。为了支持区分的服务, 802.11e 引入了一种混合协调功能 (HCF), 其中包含两种并行机制: 混合控制信道访问 (HCCA) 和增强分布式协调访问 (EDCA)。本项目中基于 EDCA 功能展开。

EDCA 通过引入四个不同的接入类型 (AC) 来提供 QoS 保障。传统的 802.11

信道接入方式维护一个发送队列，所有业务数据平等的进行信道竞争，不同于此，每个 AC 的数据维护各自的发送队列，通过竞争窗口控制每个队列竞争获得信道的概率不同。如图 4.11 所示，四个队列按权重从低到高依次是：AC\_BK(背景数据),AC\_BE(尽最大努力传送),AC\_VI(视频),AC\_VO(声音)，依次编号为 AC(0), AC(1), AC(2), AC(3)。不同的权重通过设置不同的信道竞争参数实现，包括竞争窗口界限、仲裁帧间隔、发送机会限制。

默认情况下，QoS 支持在 EDCA 中的实现是通过将实时数据包括音频视频映射到 AC(2) 和 AC(3) 中，其他的数据则映射到 AC(0) 和 AC(1)。EDCA 机制不考虑视频帧的不同类型之间重要性的区别，将所有的编码都映射到 AC(2) 中。然而，在视频监控的场景中，除了少量的控制数据，几乎所有的数据都是视频数据，这些数据都被映射到同一队列，很容易造成该队列的饱和，进一步造成丢包，影响传输质量。因此，在无线 Mesh 网络中，尤其在视频流作为主要传输数据的场景中，应该充分挖掘视频帧编码之间的差异，利用 EDCA 四个队列的功能来实现更好的用户观看体验。之前已经有一些工作做过这方面的尝试，图 4.12 给出了静态映射和动态映射的对比。静态映射，比如 [Ieee 802.11 e wireless lan for quality of service]，仅仅将不同重要性的帧固定的放入固定的队列，这样会造成优先队列资源的浪费。动态映射，比如 [Adaptive scheduling for wireless video transmission in high-speed networks]，进一步考虑网络地动态状况和队列地占用情况，动态地进行队列映射，提高了网络地利用度。

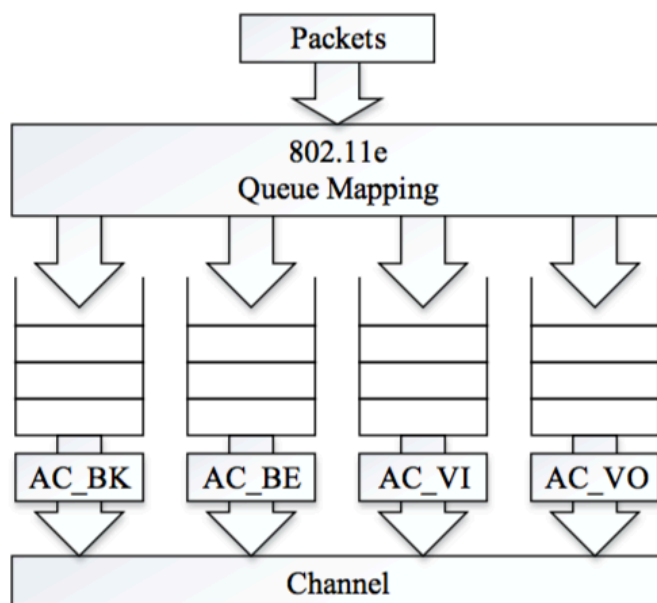


图 4.11 EDCA 的四个 AC 队列

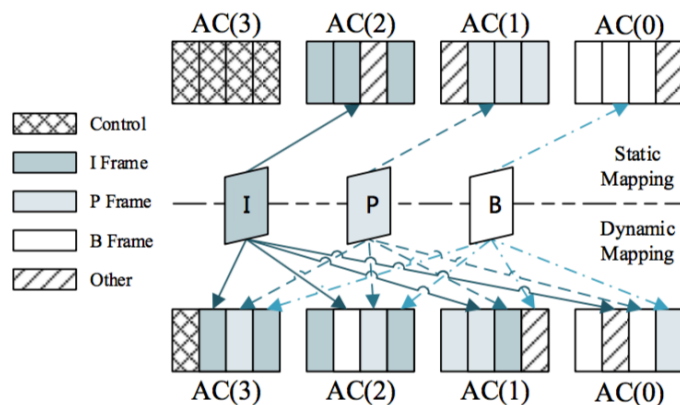


图 4.12 静态映射和动态映射机制示例

### 4.2.3 视频帧映射机制

基于 GOP 编码结构和 EDCA 机制，结合细粒度地分析视频数据包，我们提出了一种跨层映射方案，实验显示该所提方案相对于朴素地基于 EDCA 传输方案，优化效果 >50%。

在视频监控系统中，视频数据占所传输带宽的绝大部分。在衡量视频传输质量的时候，除了传统网络度量参数如丢包率等，更重要的是视频观看体验，目前普遍使用的衡量指标是峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性指标 (SSIM)。视频传输的流畅、实时、清晰是视频监控系统的首要目标。

受通用视频编码技术中的分层编码的影响，可以认为不同类型的帧对视频的传输质量贡献不同。这是由分层编码中 GOP 内部不同帧之间的依赖关系决定的。如前所述，I 帧独立于其他帧，可独立解码其压缩率也最低；P 帧依赖于其之前的 I 帧或者 P 帧，压缩率次之；B 帧压缩率最高，但需要依赖其前后的 I 帧或者 P 帧来解码。不难发现，I 帧丢失则该 GOP 内全部的帧都无法解码；P 帧丢失则其后的所有帧无法解码，B 帧丢失则仅其自身无法解码，不影响其他帧。

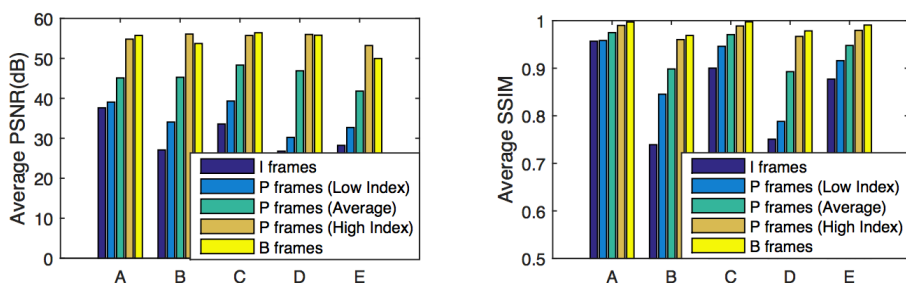


图 4.13 I 帧、P 帧、B 帧丢失对视频质量的影响比较

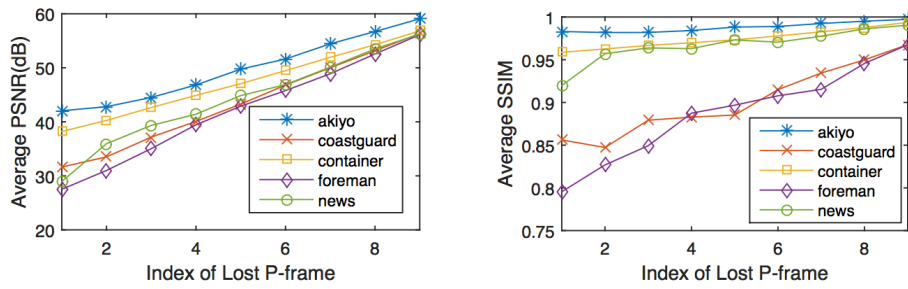


图 4.14 不同位置的 P 帧丢失对视频质量的影响比较

图 4.13和图 4.14 给出了 I 帧、P 帧、B 帧以及同一个 GOP 中不同位置的 P 帧丢失对视频质量的影响。可以看出，和我们预测的相同，在相同的数量上上，I 帧对视频质量的贡献明显大于 P 帧，P 帧中出现在靠前位置的 P 帧影响力又要大于之后的 P 帧，而 B 帧对视频质量的影响最小。

之前的关于映射机制的工作，仅仅按照编码帧的类型进行映射，而没有考虑不同位置帧的重要性不同。我们将这一点引入映射机制，综合考虑帧的类型和位置。下面详细介绍该映射机制的细节原理和实现。其中核心分为两部分，帧权重计算和帧映射。

表 4.3 本章符号检索

符号	信道 (L1-L2)
N, M	GOP 参数
$\omega$	数据包权重值
$f_0$	受当前帧影响的帧数量
$f_1$	影响当前帧的帧数量
$\alpha, a, b$	权重值计算公式参数
$b_0$	权重值基线
h	帧分解的第一个数据包的额外权重
p	P 帧在 GOP 中的位置索引
$threshold(i)$	AC(i) 的最大队列缓存
$qlen(i)$	AC(i) 当前使用长度

### A. 权重计算

对于 I 帧，因为其相对于 P 帧和 B 帧数量极少，且对于解码 GOP 起到至关重要的作用，所以在权重上赋最大值 1，即为  $\omega_1$ ；对于 P 帧和 B 帧，它们的重要性和它们之前的需要依赖的帧以及它们后续的依赖于它们的帧有关。这里我们定义受当前帧影响的帧数量为  $f_0$ ，对当前帧有影响的帧数量为  $f_1$ 。进一步的定义当前

帧的权重计算公式为：

$$\omega = g(f_0 \alpha^{f_1})$$

在这里， $\alpha \in (0, 1)$  是一个权重常量，用来平衡  $f_0$  和  $f_1$ ,  $f_0 \geq 1$  (所有的 P 帧和 B 帧至少被 I 帧影响),  $f_1 \geq 1$  (每一个帧至少影响它本身),  $g(x)$  是一个单调递增函数。这意味着，越多的帧依赖于当前帧，或依赖于当前帧的帧越少，则当前帧的权重就越高。更直观的讲，就是在一个 GOP 中出现越早的帧相对于晚出现的帧权重更高。

为了降低 Mesh 节点的计算开销， $g(x)$  定义为：

$$g(x) = a(\log(x) + b) + b_0$$

带入  $\omega$  表达式则有 P 帧和 B 帧数据包的权重值计算公式：

$$\omega = a(\log f_0 + f_1 \log \alpha + b) + b_0$$

上式中， $b_0$  是作为权重值的基线，确保 B 帧能够有机会进入优先级较高的队列。 $a$ 、 $b$  和  $b_0$  用来限制  $\omega$  在  $[b_0, 1]$  的范围内。可推出  $a$ 、 $b$  值如下：

$$a = \frac{1 - b_0}{\log(N) - \log(\alpha^{N/M})}$$

$$b = -\log(\alpha^{N/M})$$

上式中， $\log(N)$  和  $\log(\alpha^{N/M})$  分别为  $\log(f_0 \alpha^{f_1})$  的最大值和最小值。对于一个 GOP 中的第  $p(p>0)$  个 P 帧， $f_0 = N - 1 - M * p$ ,  $f_1 = p$ 。对于任意子第  $p$  个 P 帧后的 B 帧，有  $f_0 = 1$ ,  $f_1 = 2$ 。

目前为止，我们定义了普通的视频帧数据包的权重计算方法，该方法充分利用的 GOP 结构中不同类型帧不同的重要性。下面我么考虑利用同类型不同位置帧重要性不同的性质，其中关键的是一个视频帧被底层协议拆分为一个个的数据包时，最重要的是第一个数据包，其中包含了编码重要的信息。我们选择添加一个额外的值  $h$  来提升第一个数据包的权重。如果出现  $\omega + h > 1$ ，就设置  $\omega = 0.99$ 。之所以这里不设  $\omega$  为 1 是考虑到防止 P 帧或者 B 帧抢占 I 帧的优先权，在保证 I 帧绝对优先权的基础上最大限度提升 P 帧或者 B 帧较重要的数据包的传输几率。

## B. 帧映射

所谓帧映射就是将属于不同类型帧的数据包映射到不同的 EDCA 的 AC 中,区分他们在发送时的优先权。根据上一节涉及的权重计算方法,可以计算出每一个视频帧对应的权重值,帧映射即可以根据该权重值完成。映射的直接原则是充分使用高权重队列以降低传输延迟和丢包率。当网络质量良好,传输数据量较小时,甚至可以将 B 帧映射到 AC(0) 中,所有帧都可以以最低延迟,最高的优先权完成传输。相反,当网络质量较差,网络传输数据量过大,造撑拥堵时,映射机制优先将 I 帧映射到最高优先权队列,保证 I 帧的传输质量。

当一个数据包到达时,映射机制将顺序从最高优先权队列 AC(3) 开始依次检测。如果发现当前 AC 有足够的缓冲区余量,且满足映射标准,即将数据包插入该 AC 中。判定的标准为,给定一个数据包的权重假设为  $\omega$ ,如果  $\omega * threshold(i) > qlen(i)$ ,就将数据包插入队列 AC(i); 否则,继续检查优先权次之的队列。其中,  $threshold(i)$  和  $qlen(i)$  是 AC(i) 可以通过底层 API 读取的最大队列长度和当前队列占用。如果一个数据包不能够插入 AC(3), AC(2) 和 AC(1), 那么就直接插入 AC(0) 而不需要进行进一步的检查。映射算法尽可能设计的简单以减少 Mesh 节点的计算开销,因为在工业应用中, Mesh 节点能源和计算资源都比较稀缺。

上面的队列映射策略给予了更高权重的数据包更高的概率插入高优先级队列,同时阻止低权重的数据包阻塞队列。

## C. 映射系统实现

队列映射如图 4.15 所示,跨层架构设计也在图 4.16 中展示。在结构设计上,因为 BATMAN-adv 协议主要工作在 mac 层,且 EDCA 的四个 AC 也在 mac 层实现,所以我们的权重计算和映射模块均在 mac 层实现。尽管如此,我们需要在考虑来自引用层的数据,网络层的 ToS 字段,以及物理层的队列大小及占用情况。实际系统中,每个视频帧的数据包,其权重均在产生该数据包的第一个 Mesh 节点计算。当一个 Mesh 节点接到请求需要发送视频数据时,首先解构 GOP 为 I 帧、P 帧和 B 帧,然后将各个帧在网络层封装为较小的数据包,之后就根据每个数据包所属帧的类型、位置和数据包是否为帧的头数据包等计算数据包的权重。之后数据包的权重值一直维护在数据包中,在网络传输的过程中不会改变该权重值。在最近的实现中,我们将权重值存储在网络层包头的 ToS 字段中。

数据包传输到网络中间任一节点时,该节点队列映射也按如图 4.15 所示进行,但不需要重新计算权重值,只需要从 ToS 字段中取的该权重值即可,之后就根据该权重值,将数据包插入相应的 AC 中。

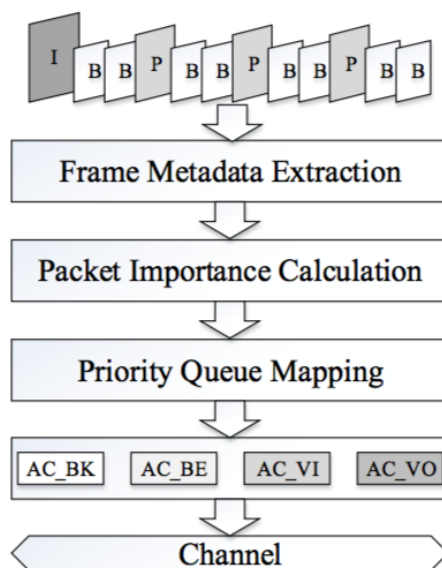


图 4.15 映射机制流程

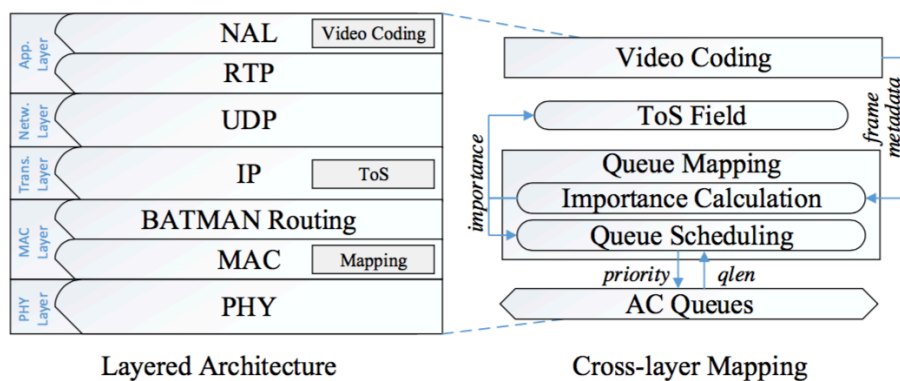


图 4.16 映射机制跨层设计

#### 4.2.4 实验验证

##### A. 实验方法

在 3.1 节已经介绍了项目所采用的软件系统和硬件平台。更细致地，OpenWRT 内置的 *mac80211* 模块控制数据包的收发。队列选择是数据包发送过程中的一个子环节。

## 插图索引

图 2.1	利用 Xfig 制图 .....	18
图 2.2	包含子图形的大图形 (subcaptionbox 示例) .....	19
图 2.3	包含子图形的大图形 (subfigure 示例) .....	19
图 2.4	并排第一个图 .....	20
图 2.5	并排第二个图 .....	20
图 3.1	计算 TQ .....	23
图 3.2	TQ 传播 .....	24
图 3.3	路由选择示例 .....	24
图 4.1	相邻链路干扰实验图示 .....	27
图 4.2	单跳带宽测试 .....	29
图 4.3	隐终端带宽测试 .....	29
图 4.4	单跳带宽测试实验结果 .....	30
图 4.5	隐终端带宽测试实验结果 (rts 打开 vsrts 关闭) .....	31
图 4.6	发送功率对带宽影响 .....	31
图 4.7	隐终端带宽测试实验结果 (增加发送功率作为因变量) .....	32
图 4.8	子网划分实验床 .....	33
图 4.9	子网划分后的干扰示意图 .....	33
图 4.10	GOP 结构示例, GOP(12,3) .....	36
图 4.11	EDCA 的四个 AC 队列 .....	37
图 4.12	静态映射和动态映射机制示例 .....	38
图 4.13	I 帧、P 帧、B 帧丢失对视频质量的影响比较 .....	38
图 4.14	不同位置的 P 帧丢失对视频质量的影响比较 .....	39
图 4.15	映射机制流程 .....	42



图 4.16 映射机制跨层设计 .....	42
-----------------------	----

## 表格索引

表 1.1	模板文件 .....	4
表 1.2	复杂表格示例 1.....	4
表 1.3	第一个并排子表格 .....	5
表 1.4	第二个并排子表格 .....	5
表 1.5	并排子表格.....	5
表 1.6	复杂表格示例 2.....	6
表 1.7	实验数据 .....	6
表 4.1	相邻链路干扰实验结果.....	27
表 4.2	子网划分性能提升对比.....	34
表 4.3	本章符号检索 .....	39

## 公式索引

公式 1-1 .....	8
公式 1-2 .....	8
公式 1-3 .....	9
公式 1-4 .....	9
公式 1-5 .....	9
公式 1-6 .....	9
公式 1-7 .....	9
公式 1-8 .....	9
公式 1-9a .....	10
公式 1-9b .....	10
公式 1-10 .....	10
公式 1-11 .....	10
公式 1-12 .....	11
公式 1-13 .....	12
公式 1-14 .....	12
公式 1-15 .....	12
公式 2-1 .....	18
公式 3-1 .....	23
公式 A-1 .....	51
公式 A-2 .....	52

## 参考文献

- [1] Knuth D E. The  $\text{\TeX}$  Book. 15th ed., Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] Goosens M, Mittelbach F, Samarin A. The  $\text{\LaTeX}$  Companion. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1994: 112–125.
- [3] Gröning P, Nilsson L, Ruffieux P, et al. Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, volume 1. American Scientific Publishers, 2004: 547–579.
- [4] Krasnogor N. Towards robust memetic algorithms. In: Hart W, Krasnogor N, Smith J, (eds.). Recent Advances in Memetic Algorithms. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 185–207.
- [5] 阎真. 沧浪之水. 人民文学出版社, 2001: 185–207.
- [6] 班固. 苏武传. 见: 郑在瀛, 汪超宏, 周文复, 编. 传记散文英华. 武汉: 湖北人民出版社, 1998: 65–69.
- [7] Chafik El Idrissi M, Roney A, Frigon C, et al. Measurements of total kinetic-energy released to the  $N = 2$  dissociation limit of  $\text{H}_2$  — evidence of the dissociation of very high vibrational Rydberg states of  $\text{H}_2$  by doubly-excited states. Chemical Physics Letters, 1994, 224(10):260–266.
- [8] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon-monoxide nd triplet Rydberg series-experimental results and multichannel quantum-defect analysis. J. Chem. Phys., 1996, 104(5):8913–8921.
- [9] Shell M. How to use the IEEEtran  $\text{\LaTeX}$  class. Journal of  $\text{\LaTeX}$  Class Files, 2002, 12(4):100–120.
- [10] 猪八戒. 论流体食物的持久保存 [硕士学位论文]. 北京: 广寒宫大学, 2005.
- [11] Jeyakumar A R. Metamori: A library for incremental file checkpointing[D]. Blacksburg: Virgina Tech, June 21, 2004.
- [12] 沙和尚. 论流沙河的综合治理 [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.
- [13] Zadok E. FiST: A System for Stackable File System Code Generation[D]. USA: Computer Science Department, Columbia University, May, 2001.
- [14] IEEE Std 1363-2000. IEEE Standard Specifications for Public-Key Cryptography. New York: IEEE, 2000.
- [15] Kim S, Woo N, Yeom H Y, et al. Design and Implementation of Dynamic Process Management for Grid-enabled MPICH. the 10th European PVM/MPI Users' Group Conference, Venice, Italy, 2003.
- [16] Kocher C, Jaffe J, Jun B. Differential power analysis. In: Wiener M, (eds.). Advances in Cryptology (CRYPTO '99), volume 1666 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag, 1999. 388–397.

- [17] Woo A, Bailey D, Yarrow M, et al. The NAS parallel benchmarks 2.0. Technical report, The Pennsylvania State University CiteSeer Archives, December 05, 1995. <http://www.nasa.org/>.
- [18] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道 [EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/200112190019.htm>.
- [19] Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC[EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.
- [20] 贾宝玉, 林黛玉, 薛宝钗, 等. 论刘姥姥食量大如牛之现实意义. 红楼梦杂谈, 1800, 224:260–266.
- [21] 王重阳, 黄药师, 欧阳峰, 等. 武林高手从入门到精通. 第  $N$  次华山论剑, 西安, 中国, 2006.

## 致 谢

衷心感谢导师 xxx 教授和物理系 xxx 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 xxx 教授热心指导与帮助，不胜感激。感谢 xx 实验室主任 xx 教授，以及实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

感谢 THUThesis，它的存在让我的论文写作轻松自在了许多，让我的论文格式规整漂亮了许多。

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，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，本学位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：\_\_\_\_\_

## 附录 A 外文资料原文

### The title of the English paper

**Abstract:** As one of the most widely used techniques in operations research, *mathematical programming* is defined as a means of maximizing a quantity known as *objective function*, subject to a set of constraints represented by equations and inequalities. Some known subtopics of mathematical programming are linear programming, nonlinear programming, multiobjective programming, goal programming, dynamic programming, and multilevel programming<sup>[1]</sup>.

It is impossible to cover in a single chapter every concept of mathematical programming. This chapter introduces only the basic concepts and techniques of mathematical programming such that readers gain an understanding of them throughout the book<sup>[2,3]</sup>.

### A.1 Single-Objective Programming

The general form of single-objective programming (SOP) is written as follows,

$$\begin{cases} \max f(x) \\ \text{subject to:} \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (123)$$

which maximizes a real-valued function  $f$  of  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  subject to a set of constraints.

**Definition A.1:** In SOP, we call  $x$  a decision vector, and  $x_1, x_2, \dots, x_n$  decision variables. The function  $f$  is called the objective function. The set

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p\} \quad (456)$$

is called the feasible set. An element  $x$  in  $S$  is called a feasible solution.

**Definition A.2:** A feasible solution  $x^*$  is called the optimal solution of SOP if and only if

$$f(x^*) \geq f(x) \quad (\text{A-1})$$



for any feasible solution  $x$ .

One of the outstanding contributions to mathematical programming was known as the Kuhn-Tucker conditions A-2. In order to introduce them, let us give some definitions. An inequality constraint  $g_j(x) \leq 0$  is said to be active at a point  $x^*$  if  $g_j(x^*) = 0$ . A point  $x^*$  satisfying  $g_j(x^*) \leq 0$  is said to be regular if the gradient vectors  $\nabla g_j(x)$  of all active constraints are linearly independent.

Let  $x^*$  be a regular point of the constraints of SOP and assume that all the functions  $f(x)$  and  $g_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  are differentiable. If  $x^*$  is a local optimal solution, then there exist Lagrange multipliers  $\lambda_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  such that the following Kuhn-Tucker conditions hold,

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(x^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

If all the functions  $f(x)$  and  $g_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  are convex and differentiable, and the point  $x^*$  satisfies the Kuhn-Tucker conditions (A-2), then it has been proved that the point  $x^*$  is a global optimal solution of SOP.

### A.1.1 Linear Programming

If the functions  $f(x)$ ,  $g_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  are all linear, then SOP is called a *linear programming*.

The feasible set of linear is always convex. A point  $x$  is called an extreme point of convex set  $S$  if  $x \in S$  and  $x$  cannot be expressed as a convex combination of two points in  $S$ . It has been shown that the optimal solution to linear programming corresponds to an extreme point of its feasible set provided that the feasible set  $S$  is bounded. This fact is the basis of the *simplex algorithm* which was developed by Dantzig as a very efficient method for solving linear programming.

Roughly speaking, the simplex algorithm examines only the extreme points of the feasible set, rather than all feasible points. At first, the simplex algorithm selects an extreme point as the initial point. The successive extreme point is selected so as to improve the objective function value. The procedure is repeated until no improvement in objective function value can be made. The last extreme point is the optimal solution.

Table 1 This is an example for manually numbered table, which would not appear in the list of tables

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

### A.1.2 Nonlinear Programming

If at least one of the functions  $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$  is nonlinear, then SOP is called a *nonlinear programming*.

A large number of classical optimization methods have been developed to treat special-structural nonlinear programming based on the mathematical theory concerned with analyzing the structure of problems.



Figure 1 This is an example for manually numbered figure, which would not appear in the list of figures

Now we consider a nonlinear programming which is confronted solely with maximizing a real-valued function with domain  $\mathcal{R}^n$ . Whether derivatives are available or not, the usual strategy is first to select a point in  $\mathcal{R}^n$  which is thought to be the most likely place where the maximum exists. If there is no information available on which to base such a selection, a point is chosen at random. From this first point an attempt is made to construct a sequence of points, each of which yields an improved objective function value over its predecessor. The next point to be added to the sequence is chosen by analyzing the behavior of the function at the previous points. This construction continues until some termination criterion is met. Methods based upon this strategy are called *ascent methods*, which can be classified as *direct methods*, *gradient methods*, and *Hessian methods* according to the information about the behavior of objective function  $f$ . Direct methods require only that the function can be evaluated at each point. Gradient methods require the evaluation of first derivatives of  $f$ . Hessian methods require the evaluation of second derivatives. In fact, there is no superior method for all problems. The efficiency of a

method is very much dependent upon the objective function.

### A.1.3 Integer Programming

*Integer programming* is a special mathematical programming in which all of the variables are assumed to be only integer values. When there are not only integer variables but also conventional continuous variables, we call it *mixed integer programming*. If all the variables are assumed either 0 or 1, then the problem is termed a *zero-one programming*. Although integer programming can be solved by an *exhaustive enumeration* theoretically, it is impractical to solve realistically sized integer programming problems. The most successful algorithm so far found to solve integer programming is called the *branch-and-bound enumeration* developed by Balas (1965) and Dakin (1965). The other technique to integer programming is the *cutting plane method* developed by Gomory (1959).

*Uncertain Programming* (BaoDing Liu, 2006.2)

## References

*NOTE: These references are only for demonstration. They are not real citations in the original text.*

- [1] Donald E. Knuth. The  $\text{\TeX}$ book. Addison-Wesley, 1984. ISBN: 0-201-13448-9
- [2] Paul W. Abrahams, Karl Berry and Kathryn A. Hargreaves.  $\text{\TeX}$  for the Impatient. Addison-Wesley, 1990. ISBN: 0-201-51375-7
- [3] David Salomon. The advanced  $\text{\TeX}$ book. New York : Springer, 1995. ISBN:0-387-94556-3

附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译

英文资料的中文标题

**摘要：** 本章为外文资料翻译内容。如果有摘要可以直接写上来，这部分好像没有明确的规定。

B.1 单目标规划

北冥有鱼，其名为鲲。鲲之大，不知其几千里也。化而为鸟，其名为鹏。鹏之背，不知其几千里也。怒而飞，其翼若垂天之云。是鸟也，海运则将徙于南冥。南冥者，天池也。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \tag{123}$$

吾生也有涯，而知也无涯。以有涯随无涯，殆已！已而为知者，殆而已矣！为善无近名，为恶无近刑，缘督以为经，可以保身，可以全生，可以养亲，可以尽年。

B.1.1 线性规划

庖丁为文惠君解牛，手之所触，肩之所倚，足之所履，膝之所倚，砉然响然，奏刀騞然，莫不中音，合于桑林之舞，乃中经首之会。

表 1 这是手动编号但不出现在索引中的一个表格例子

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

文惠君曰：“嘻，善哉！技盖至此乎？”庖丁释刀对曰：“臣之所好者道也，进乎技矣。始臣之解牛之时，所见无非全牛者；三年之后，未尝见全牛也；方今之时，臣以神遇而不以目视，官知止而神欲行。依乎天理，批大郤，导大窾，因其固然。技经肯綮之未尝，而况大瓠乎！良庖岁更刀，割也；族庖月更刀，折也；今臣之刀十九年矣，所解数千牛矣，而刀刃若新发于硎。彼节者有间而刀刃者无厚，以

无厚入有间，恢恢乎其于游刃必有余地矣。是以十九年而刀刃若新发于硎。虽然，每至于族，吾见其难为，怵然为戒，视为止，行为迟，动刀甚微，謦然已解，如土委地。提刀而立，为之而四顾，为之踌躇满志，善刀而藏之。”

文惠君曰：“善哉！吾闻庖丁之言，得养生焉。”

### B.1.2 非线性规划

孔子与柳下季为友，柳下季之弟名曰盗跖。盗跖从卒九千人，横行天下，侵暴诸侯。穴室枢户，驱人牛马，取人妇女。贪得忘亲，不顾父母兄弟，不祭先祖。所过之邑，大国守城，小国入保，万民苦之。孔子谓柳下季曰：“夫为人父者，必能诏其子；为人兄者，必能教其弟。若父不能诏其子，兄不能教其弟，则无贵父子兄弟之亲矣。今先生，世之才士也，弟为盗跖，为天下害，而弗能教也，丘窃为先生羞之。丘请为先生往说之。”



图 1 这是手动编号但不出现索引中的图片的例子

柳下季曰：“先生言为人父者必能诏其子，为人兄者必能教其弟，若子不听父之诏，弟不受兄之教，虽今先生之辩，将奈之何哉？且跖之为人也，心如涌泉，意如飘风，强足以距敌，辩足以饰非。顺其心则喜，逆其心则怒，易辱人以言。先生必无往。”

孔子不听，颜回为驭，子贡为右，往见盗跖。

### B.1.3 整数规划

盗跖乃方休卒徒大山之阳，脍人肝而铺之。孔子下车而前，见谒者曰：“鲁人孔丘，闻将军高义，敬再拜谒者。”谒者入通。盗跖闻之大怒，目如明星，发上指冠，曰：“此夫鲁国之巧伪人孔丘非邪？为我告之：尔作言造语，妄称文、武，冠枝木之冠，带死牛之胁，多辞缪说，不耕而食，不织而衣，摇唇鼓舌，擅生是非，以迷天下之主，使天下学士不反其本，妄作孝弟，而侥幸于封侯富贵者也。子之罪大极重，疾走归！不然，我将以子肝益昼铺之膳。”

## 附录 C 其它附录

前面两个附录主要是给本科生做例子。其它附录的内容可以放到这里，当然如果你愿意，可以把这部分也放到独立的文件中，然后将其 `\input` 到主文件中。

## 个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历

xxxx 年 xx 月 xx 日出生于 xx 省 xx 县。

xxxx 年 9 月考入 xx 大学 xx 系 xx 专业，xxxx 年 7 月本科毕业并获得 xx 学士学位。

xxxx 年 9 月免试进入 xx 大学 xx 系攻读 xx 学位至今。

### 发表的学术论文

- [1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235. (SCI 收录, 检索号:758FZ.)
- [2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291. (EI 收录, 检索号:0534931 2907.)
- [3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193. (EI 源刊.)
- [4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用. SCI 源刊.)
- [5] Wu X M, Yang Y, Cai J, et al. Measurements of ferroelectric MEMS microphones. Integrated Ferroelectrics, 2005, 69:417-429. (SCI 收录, 检索号:896KM)
- [6] 贾泽, 杨轶, 陈兢, 等. 用于压电和电容微麦克风的体硅腐蚀相关研究. 压电与声光, 2006, 28(1):117-119. (EI 收录, 检索号:06129773469)
- [7] 伍晓明, 杨轶, 张宁欣, 等. 基于 MEMS 技术的集成铁电硅微麦克风. 中国集成电路, 2003, 53:59-61.

### 研究成果

- [1] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A. (中国专利公开号)

- [2] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102. (美国发明专利申请号)