



VBR 流视频存储 I/O 及传输优化

谢建国



科学出版社

www.sciencep.com

VBR 流视频存储、I/O 及传输优化

谢建国

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书围绕 VBR 流视频在磁盘存储、存取服务、网络传输过程中所涉及的问题而展开研究与讨论,主要包括: VBR 流式视频的网络 I/O 调度与缓冲、VBR 流式视频传输中的率平滑规划、VBR 视频的磁盘存储及 VBR 流视频磁盘 I/O 与平滑检索、可伸缩编码视频特性分析、可伸缩视频网络适应性传输综述、伸缩视频适应性传输算法以及视频错误传输保护比较研究等。

图书在版编目(CIP)数据

VBR 流视频存储、I/O 及传输优化 / 谢建国. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-023240-3

I. V… II. 谢… III. 图像通信 IV. TN919.85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 164122 号

责任编辑: 王雨舸 / 责任校对: 曾 莉
责任印制: 彭 超 / 封面设计: 苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉科利德印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2008 年 7 月第一次印刷 印张: 6 7/8

印数: 1—1 500 字数: 210 000

定价: 29.80 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

信息技术的进展已经改变了人们对音频和视频的使用。在过去,人们通过收音机收听音频广播,通过电视观看电视节目,通过电话网络和另一方进行交互式的语音通信。现在,一些技术取得了巨大发展,这主要得益于网络技术、音视频压缩技术的耀眼发展。现在的人们希望在使用互联网时,不仅仅满足于进行文字和图像通信,还要求能得到音频和视频服务。

如今,VCD、DVD 作为存储光盘的视频应用,在人们的生活中已经产生了巨大影响。网络视频或网络流媒体概念提出多年,发展至今虽已陆续被应用,但仍受制于一些关键技术,这些技术包括网络技术和视频压缩技术。其中网络技术包括:与实时服务不相符的 IP 网络尽力传输模式,以及由此而来的动态带宽、延迟抖动和传输错误问题,而异构网络和个性化的用户终端也是网络视频服务要面临的关键问题。视频压缩技术包括:压缩效率和编码组织方式等能否适应和匹配现今复杂的网络问题。

在这里,将网络视频分成:存储视频、直播视频和交互式视频。本书主要将注意力放在变比特率编码的存储视频在网络服务方面的一些技术和方法,从视频的磁盘存储、并发流输入/输出到网络优化传输等均有一定的研究。

本书围绕 VBR 流视频在磁盘存储、存取服务、网络传输过程中所涉及的问题而展开研究与讨论,主要内容包括:VBR 流式视频的网络 I/O 调度与缓冲、VBR 流式视频传输中的率平滑规划、VBR 视频的磁盘存储及 VBR 流视频磁盘 I/O 与平滑检索、可伸缩编码视频特性分析、可伸缩视频网络适应性传输综述、伸缩视频适应性传输算法以及视频错误传输保护比较研究等。本书共 11 章,第 1 章介绍了视频编码中

变比特的来源和特性;第2~5章研究变比特率编码视频的率平滑传输问题;第6~7章研究VBR编码视频的磁盘存储与平滑存取问题;第8~11章研究可伸缩编码视频的网络适应性传输与传输错误保护等问题。

作者感谢博士生导师陈松乔教授、陈建二教授的教导,感谢博士后合作导师高文教授的教导,以及感谢研究和工作期间给予帮助的老师、同学和同事们。由于水平有限,书中难免有缺点和错误,欢迎各界专家和读者朋友批评指正。

谢建国

2008年5月

目 录

第 1 章 变比特率编码视频.....	1
1.1 引言	1
1.2 视频的 VBR 特性	4
第 2 章 流视频并行 I/O 优化	12
2.1 多网络 I/O 系统模型	12
2.2 单网络 I/O 调度	14
2.3 多网络 I/O 调度	15
2.4 优化调度与流接纳.....	18
2.5 仿真结果及性能评价.....	23
第 3 章 VBR 流视频的率平滑传输	26
3.1 概述.....	26
3.2 变比特率平滑模型.....	27
3.3 最短路径问题.....	30
3.4 最短路径率平滑传输算法.....	34
3.5 快速传输率平滑算法.....	37
3.6 实验结果.....	39
3.7 其他存储视频率平滑算法.....	41
第 4 章 基于网络特性的率平滑算法	47
4.1 异步传输的率平滑算法.....	47

4.2	残余带宽下的视频传输算法	57
第 5 章	流视频实时率平滑	68
5.1	优化的实时率平滑模型	69
5.2	优化的实时率平滑算法	72
5.3	相关研究的比较	78
5.4	实验结果与比较	83
第 6 章	流视频的存储优化	89
6.1	视频存储技术的发展	89
6.2	单磁盘接纳计算模型	96
6.3	MZ 单磁盘存储策略	100
6.4	MZ 磁盘组存储策略	105
第 7 章	磁盘 I/O 率平滑	113
7.1	二次率平滑算法	113
7.2	磁盘 I/O 率平滑模型	117
7.3	基于分块的率平滑调度算法	118
7.4	磁盘 I/O 的 On-Off 调度	124
7.5	率平滑检索算法	129
第 8 章	流视频适应性传输概论	138
8.1	流视频的应用研究	138
8.2	视频编码与传输	141
8.3	流技术面临的挑战	143

第 9 章 可伸缩流视频 VBR 特性	149
9.1 分层扩展性编码	149
9.2 先进的可扩展性编码	151
9.3 FGS 编码的比特率特性	154
9.4 FGS 编码的质量特性	157
 第 10 章 流视频带宽适应性传输算法	 163
10.1 引言	163
10.2 前期基础	164
10.3 问题描述	167
10.4 带宽适应性传输算法	169
10.5 算法性能分析	172
10.6 实验结果与讨论	174
 第 11 章 流视频传输错误保护	 177
11.1 丢包信道错误保护算法	178
11.2 无记忆误码信道错误保护算法	184
 参考文献	 191

第 1 章 变比特率编码视频

1.1 引言

自 20 世纪 90 年代以来,流式媒体(video streaming,又称流媒体或流视频)技术一直得到研究者的重视。早期一些代表性文献所做的工作,主要集中在视频存储、磁盘调度策略以及流视频缓冲计算^[1-11]。这些研究涉及的问题虽然相对简单,且问题涉及的应用背景规模虽较小,但却是很有益的开创性工作,其中,文献[6]对这一段时期的研究工作及进展进行了全面综述。近期的一些文献从不同的应用背景,研究了流视频理论及其相关的技术,它们主要包括:变比特率编码视频的率平滑与控制技术^[12-53]、磁盘调度与接纳控制^[54-62]、视频多播(multicast)技术、视频 QoS^[63-72]、视频磁盘安置技术^[73-85]以及视频服务系统的资源管理等相关技术^[86-94],这些研究在相关的应用领域内取得了较全面的发展。而且,VoD 系统的研究与应用^[95-97]、视频会议系统的研究与应用以及远距离学习系统的研究与应用^[98-99]等,这些与流媒体技术息息相关的分布式多媒体应用系统的研究,也得到了一些实际应用。

由于网络带宽资源的限制,网络传输与服务模式的不适合,特别是变比特率(variable bit rate, VBR)特性的编码视频,需要网络高带宽的长时占用,和伴随峰值比特率的突发性,复杂了网络传输及一些 I/O 的管理,如带宽的动态分配、带宽利用率、接纳控制等问题,再加上一些相关网络技术有待进一步发展,因而 Internet 上大规模分布式多媒体应用技术的研究大多尚处于实用的初级阶段。本书针对目前 VBR 流视频在传输过程中存在的一些问题进行了研究,它们包括:流视频服务器的网络 I/O 规划与调度、VBR 流视频的率平滑传输策略、VBR 流视频磁盘上的安置以及磁盘 I/O 调度、FGS 流视频的带宽适应传输等。

在视频服务器的多网络调度与输出方面,连续媒体流理论模型^[60]可作为较好的研究基础。但由于网络出口带宽和磁盘入口带宽相比相对富裕,很少有研究者专门研究网络最大输出流的计算问题,特别是当网络输出成为瓶颈,需要多网络 I/O 的引入时,这种最大输出流的计算是必不可少的。

在 VBR 流视频的率平滑传输方面,得到了众多研究者的关注。VBR 流视频的率平滑研究分为存储视频的离线率平滑传输、弱实时视频的在线率平滑传输和强实时视频的实时率平滑传输三方面。

对于存储视频,因在传输前可以知道视频帧尺寸的全部信息,因而在传输前根据给定的条件来计算率平滑传输计划,称这种率平滑为离线率平滑(offline smoothing)^[12-26];相反,实时视频因不知道将来视频帧尺寸信息,所以这种率平滑传输计划只能实时计算,称这种率平滑为在线率平滑(online smoothing)^[27-30,33]或实时率平滑^[35-38]。

在存储视频率平滑方面,CRTT^[14]等一类相关算法讨论用单一的比特率来传递整个 VBR 视频,在这种情况下,要解决带宽或缓冲需求的极小化问题。CBA 算法^[15-16]及其一个优化版本 MCBA 算法^[17],能产生最小的峰值比特率,能极小化传输比特率的改变次数。后来提出的 MVBA 算法^[12],能极小化峰值比特率,极小化比特率的变化量,而且算法的平滑性在 Majorization^[100]指标上是率平滑最优的。文献^[18]对上述算法的率平滑性能在实验上进行了一定的比较与总结。MPS 算法^[19-20]和 MCBA 有异曲同工之效,如最小的峰值位率、极小化传输位率的改变次数,但 MPS 对这一结果给出了理论证明和其他性能标准的进一步讨论。与上述研究方法不同的是,一些文献提出用固定不变的带宽传输 VBR 视频流的 On - Off 率平滑传输算法^[20,22,24],On 传输段表示以固定速率传输视频数据,Off 传输段表示停止传输任何视频数据,整个传输过程由 On 传输段和 Off 传输段交替进行,并建立了固定传输比特率和缓冲尺寸的对应关系。

在弱实时视频方面,如电视新闻、实况转播等,这类视频对于较长的延迟是可以接受的,可以通过缓冲一部分数据来进行率平滑,这方面

的算法主要将离线的率平滑技术应用于一个给定的窗口内,来实现有限的率平滑^[29,30],由于可以有较长的延时,这类算法关键技术仍然是采用缓冲来平滑。

在强实时视频方面,如远程学习、视频会议等这类具有交互特性的视频,它们要求延迟时间短,延迟敏感强,传输这类视频以满足给定的延迟界限为目标,这类算法的关键问题是延迟受限、帧尺寸的预测、变比特率平滑^[35-38]等。离线平滑技术的研究在理论上虽能取得最优效果,但仍存在一些问题,如没有考虑网络传输特性、算法的运行效率问题、实际应用的评价等。实时率平滑技术方面还需要更多的发展,如更有效算法的提出、算法实际运行的性能稳定性等问题。

视频存储技术由于实际应用的需要,得到了较为成熟的发展^[1-2,6,10,55]。从20世纪90年代中后期,视频安置的研究取得了长足发展,如大规模媒体流的存储方面有磁盘农场(disk farm)和磁盘阵列(disk array)存储方式。另外,在存储块的安置、内存开销、接纳控制、视频文件的拆分、存储块在多磁盘上安置等进行了非常有实效的研究与比较^[7,75-85],并且,在实际应用方面出现了VoD等应用系统^[95-96]。目前视频安置方面的研究主要集中在多磁盘、多视频文件等大规模有效安置方面。另外,由于磁盘技术的发展如MZ磁盘技术,一些文献专门研究了视频在MZ磁盘上的安置问题^[81-83]。但在综合磁盘技术、VBR视频特性及热门视频的影响等方面的研究存在不足。

在磁盘I/O方面的研究主要考虑磁盘存取策略及接纳控制问题。仅考虑调度特性的算法有:RR算法以给定的逻辑服务顺序作为实际检索存储块的顺序^[6];EDF算法规定有最早截止时间的存储块优先被调度^[5];SCAN算法是对于给定位置的一组存储块寻找有最小的磁头开销,包括Bi_SCAN算法^[59]和BSCAN(batched-SCAN)算法^[54];SCAN_EDF算法是SCAN算法和EDF算法的综合^[56],先应用EDF算法,若有相同的截止时间则使用SCAN策略;另外一个综合算法是GSS算法^[9],将要服务的一组存储块进行分组,组内采用SCAN技术,组之间应用RR策略。另外,考虑VBR视频数据特性的算法有:比例服

务策略算法^[57-58]、RTL 算法^[77]等。但它们在如何结合率平滑技术、减弱视频的 VBR 性质以及提高磁盘 I/O 利用率的磁盘策略方面研究不足。

1.2 视频的 VBR 特性

视频数据是网络流媒体主要来源,要研究流媒体在网络上的传输与传播,就必须先了解流视频数据源本身的特性。本节先简单地分析流视频的 VBR 特性、特性来源,并给出一些视频数据实例描述,以供后面各章实验分析之用。

1.2.1 MPEG 视频

一幅含 640×480 个像素,每一个像素用 24 位表示图像,在未压缩的情况下该图像有 921 KB(bit),对于 30 帧/s 的流视频需要大约 221 Mb/s 的传输带宽,可以看出在目前的广域骨干网络上传送这样未经压缩的视频数据是不现实的。

目前有许多可用的数字视频压缩技术,但只有 MPEG (moving picture expert group) 和 H. 26X 系列压缩技术成为目前广泛使用的事实上的标准^[101]。MPEG 系列中其流行的家族成员有 MPEG-1、2、4。MPEG 是一个活动图像压缩标准^[102-103],主要应用于视频邮件(video mail)、视频会议(video conferencing)、电子出版(electronic publishing)、视频点播(VoD: video on demand)、网络电视以及远距离学习(distance learning)等。

一个 MPEG 技术压缩编码的视频数据流由一系列“序列”(sequence)元素组成,序列由多个图像组 GOP(group of picture)组成,图像组由一组视频帧(frame)或视频图像(picture)构成,一帧由一个或多个片(slice)构成,片中的组成单元被称为宏块(macroblock)。编码视频的详细构成说明可参阅相关文献^[36,102]及相关的 ISO 标准^[36,102]。

MPEG 中的 GOP 由三类视频帧构成: I (intracoded) 帧、P(predicted)帧和 B(bidirectional)帧。从数据量上相比,I 帧数据要多

于 P 帧数据, P 帧数据要高于 B 帧数据。编码的图像序列由两个参数 M 和 N 说明, M 表示 I 或 P 帧之间的间距, N 表示两个 I 帧之间的距离。如 $M=3$ 和 $N=9$, 则编码的帧序列周期为: IBBPBBPBBIBBPBBP, 其中 GOP 的长度为 9。

考虑到 B 是双向预测的, 所以在编码 B 帧数据前要先等后面相邻的 I 或 P 帧被编码, 可通过引入一个延时来实现。在解码 B 帧前要等相邻后面的 I 或 P 帧被送到, 若一个视频编码器产生的帧序列为: IBBPBBPBBIBBP..., 则传输顺序应改为: IPBBPBBIBBPBB...。可以看出, 除了最初的几个视频帧顺序不同外, 后面视频帧序列的传输模式同产生模式, 当然其数据和时间相关性不同。

MPEG-1 标准(ISO 93)压缩的目的是产生比特率不大于 1.5 Mb/s 的视频流, 目前被广泛地用于 VCD 格式。MPEG-2(ISO 94)标准提供了压缩率跨度很大的压缩技术, 能满足更高视觉质量的视频图像, 压缩视频的位率在 2~80 Mb/s 之间, 可广泛地用于目前的高清晰度的数字电视和 DVD 格式。

MPEG-4^[101,104-107]压缩标准起始于 1993 年, 完成于 1999 年, 其目的是为著作者、服务提供者和用户提供一组满足不同需要的技术, 和以前家族成员不同的是引入了媒体对象(media objects)和 QoS 描述符, 一组媒体对象构成一帧图像。另外, MPEG-4 和 MPEG-1、2 的本质区别是, 后者是单层编码, 前者可采用多层编码技术, 可将压缩的视频分成两种层次: 一种是基本层比特流(base layer bit stream), 包含最重要的图像信息; 另一种是一个或多个增强层(enhancement layer), 包含增强图像质量的附加信息。正是这种分层技术提高了视频压缩的伸缩性(scalable), 同时也为网络传输与应用带来了可塑性, 即可满足不同网络带宽或用户服务质量的个性化需求。正是这种伸缩性编码, 使得 MPEG-4 技术正在获得广泛的应用, 成为网络流媒体的一种主要格式。

1.2.2 流视频具有 VBR 特性

MPEG 视频编码压缩中, 有 VBR 压缩和 CBR(constant bit rate)

压缩两种。在同样资源(如网络传输带宽、磁盘存储等)许可下,VBR 方式压缩的视频与 CBR 方式压缩的视频相比能得到更好的 QoS(quality of service,服务质量)保证,由于有这样的优越性,所以网上流视频服务一般以 VBR 方式压缩的视频作为流视频数据源进行磁盘存储和网络传输。

编码视频中变比特率问题的产生,主要来自三个方面:一帧内部中一块的数据量到下一块的数据量要发生变化、一帧的数据量到下一帧的数据量要发生变化、一个场景的数据量到下一个场景的数据量也会发生变化。帧内部变比特率的影响可以忽视,因为只需要极小量的缓冲便可以消除它的影响。变比特率的主要来源发生在不同类型的编码帧和编码帧之间,因为场景与场景之间的变化也是通过帧和帧之间的变化反映出来的^[36,108-113]。经统计,通常 I 帧数据的平均尺寸是 B 帧或 P 帧数据的 10 倍以上,由于每一帧数据均维持相同的播放时长,为保证连续无抖动回放,这样发生的比特流就是变化而波动的。

1.2.3 视频 VBR 特性的分析

本书后面章节的一些实验中,要用到的一些视频源数据的名称、内容及节目性质描述见表 1.1 和表 1.2,其中一些视频源的数据分布特性见图 1.1~图 1.7。

表 1.1 视频节目内容描述

视频节目性质	视频节目名称	视频节目名称描述
卡通片	Asterix	Asterix
卡通片	Simp	Simpsons
网球比赛	ATP	ATP Tennis Final 1994: Becker - Sampras
汽车比赛	Race	Formula 1 Car at Hockenheim 1994
足球赛	Soccer	Soccer World Cup 1994: Brazil - Italy
电影	J - Park	Jurassic Park

续表

视频节目性质	视频节目名称	视频节目名称描述
电 影	Lambs	The Silence of the Lambs
电 影	Starwars	Starwars
电视录像	Term	Terminator2
电视录像	Talk	Talk—Political discussion
电视录像	Slapstick	Three slapstick episodes
电视录像	News	News
电视录像	MTV	MTV—Music clips
视频会议	Settop	Settop
歌 曲	年轻的朋友来相会	卡拉 OK 带
歌 曲	父老乡亲	卡拉 OK 带

表 1.2 VBR 视频统计特性

节目名	压缩比	帧(frames)		图片组(GOPs)		位率(bit rate)	
		平均 (bit)	峰值/ 平均	平均 (bit)	峰值/ 平均	平均 (Mb/s)	峰值 (Mb/s)
Asterix	119	22 348	6.6	268 282	4.0	0.59	1.85
Simp	143	18 576	12.9	222 841	3.8	0.46	1.49
ATP	121	21 890	8.7	262 648	3.0	0.55	1.58
Race	86	30 749	6.6	369 060	3.6	0.77	3.24
Soccer	106	25 110	7.6	301 201	3.9	0.63	2.29
J - Park	203	13 078	9.1	156 928	4.0	0.33	1.01
Lambs	363	7 312	18.4	87 634	5.3	0.18	0.85
Starwars	130	15 599	11.9	187 185	5.0	0.36	4.24
Term	243	10 904	7.3	130 865	3.1	0.27	0.74
Talk	183	14 537	7.3	174 278	2.7	0.36	1.00

续表

节目名	压缩比	帧(frames)		图片组(GOPs)		位率(bit rate)	
		平均 (bit)	峰值/ 平均	平均 (bit)	峰值/ 平均	平均 (Mb/s)	峰值 (Mb/s)
Slapstick	150	17 647	13.0	211 368	4.1	0.44	1.76
News	173	15 358	12.4	184 299	6.0	0.38	2.23
MTV	134	19 780	12.7	237 378	6.1	0.49	2.71
Settop	305	6 031	7.7	72 379	2.0	0.15	0.27

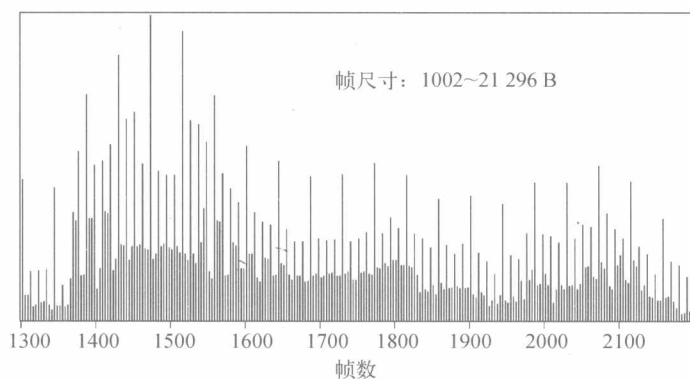


图 1.1 视频 Race 中一段帧数据尺寸分布示意图

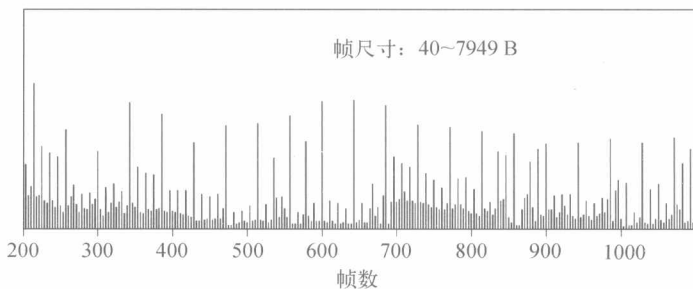


图 1.2 视频 Term 中一段帧数据尺寸分布示意图

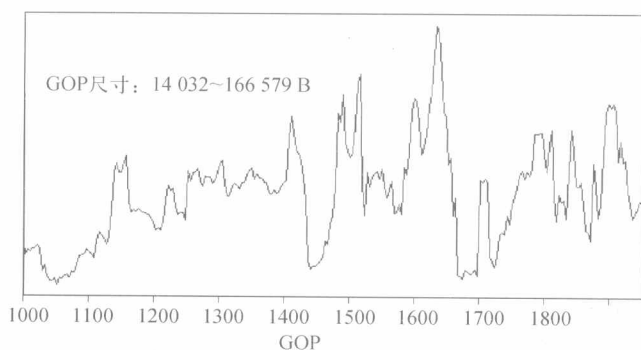


图 1.3 视频 Race 中一段 GOP 数据尺寸分布示意图

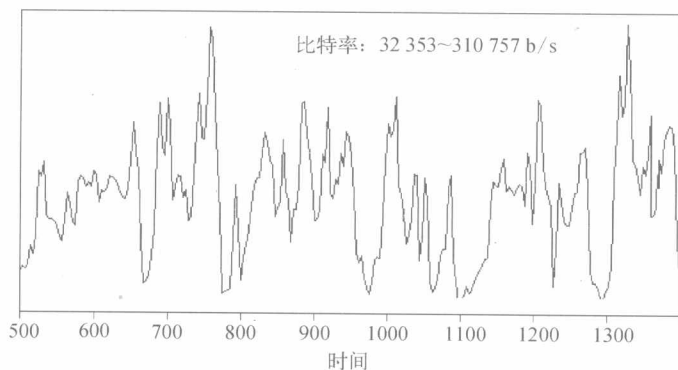


图 1.4 视频 Race 中一段比特率分布示意图

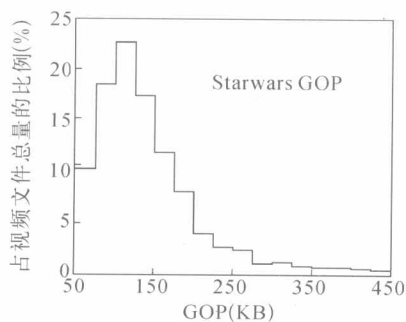


图 1.5 视频 Starwars GOP 统计分布图

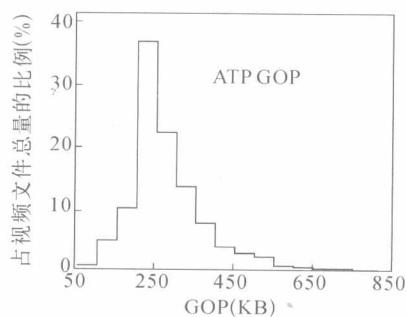


图 1.6 视频 ATP GOP 统计分布图