

VBR 视频的平滑检索算法

谢建国, 陈松乔, 陈建二

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 集 VBR 视频平滑技术和 MZ 磁盘安置技术于一体, 综合优化磁盘 I/O 带宽、内存及磁盘存储空间需求, 提出极小化缓冲代价、极小化峰值数据磁盘检索时间和最大磁盘空间利用率的平滑检索算法, 及相应的视频对象存储模式. 实验结果说明了算法的有效性.

关键词: VBR 视频; MZ 磁盘; 平滑; 磁盘检索

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08-1235-04

The Smoothing Retrieval Algorithm for VBR Video

XIE Jianguo, CHEN Song-qiao, CHEN Jian'er

(The college of information science & engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: By Integrating the smoothing techniques and placement methods of VBR video on MZ disk, and synthetically optimizing the requirement of disk I/O bandwidth, memory and disk storage space, the paper gives a smoothing retrieval algorithm that minimizes the memory cost and disk retrieval time of peak data rate, and maximizes utilization of disk storage space. A corresponding storage scheme of video object on disk is proposed in this paper too. The results of experiment show the algorithm is efficient.

Key words: VBR video; MZ disk; smoothing; disk retrieval

1 引言

视频存储与检索是视频服务中一个关键部分, 而视频存储模式直接影响检索效率, 影响视频服务规模. 压缩的视频具有 VBR(variable bit rate) 特性^[1,2], 称这种视频为 VBR 视频, 实时传输 VBR 视频, 使带宽资源的分配及相应的接纳控制复杂化. 带宽平滑技术^[3-6]是目前减弱视频 VBR 特性的主要技术, 但要实现 VBR 流的 CBR(constant bit rate) 方式传输, 需要大的内存缓冲及用户播放延迟作为代价. 另一方面, 由于磁盘存储技术的发展, MZ(Multi Zone) 磁盘^[7,8]和过去的 CAD(Constant Angular Density) 磁盘不同, MZ 磁盘被分成许多同心的区(zone), 不同的区有不同的数据传输率和存储容量, 最外边的区有最高的数据传输率和较大的存储量, 相反, 最里面的区有最低的数据传输率和较小的存储量. 磁盘的这种 MZ 特性不但增加了磁盘总的存储量, 而且提高了总的数据传输率.

一个长的 VBR 视频文件被拆分成一组块, 再安置到磁盘上, 为了保证每一块有相同的播放时长, 因而各块长是不同的, 导致磁盘检索时间不同, 复杂了磁盘 I/O 的管理. 本文综合考虑 VBR 视频和 MZ 磁盘的特性, 并结合平滑技术, 提出一个综合优化的平滑检索模型及平滑检索算法, 指出在给定的视频下如何寻找综合优化的存储模式及代价最小的内存需求.

2 预备知识

定义 1(平滑算法) 给定一对非递减函数 $L(t)$ 和 $U(t)$, 要求寻找一条尽可能平滑的规划线 $A(t)$, 满足条件 $L(t) \leq A(t) \leq U(t)$, 对于一定范围的 t , 这种方法叫做平滑算法.

一些文献^[3~5]根据不同评价指标^[6]提出了几个平滑算法, 考虑到文^[4]算法有好的优化性能, 文章的以下部分以它为研究基础, 并称它为 MVBA(minimum variable bandwidth allocation) 算法.

用 $r(z)$ 表示 MZ 磁盘第 z 个区的数据传输率, $z \in \{1, 2, \dots, Z\}$, 用向量 $R = [r(1), \dots, r(Z)]$ (以下简称 R) 表示各区数据传输率在整个磁盘上的分布, 称之为磁盘分区模式.

一个 VBR 视频文件在磁盘上被分成块来组织或检索^[8~10], 这些块构成一个视频文件的拆分模式, 用向量 $L = [l(1), l(2), \dots, l(N)]$ (以下简称 L) 来表示, $l(i)$ 表示第 i 个块的长度, N 表示块的总数. 视频安置就是讨论拆分模式中的 $l(i)$ 的安置在磁盘分区模式中的哪一个区, 下面给出安置算法的定义.

定义 2(安置算法) 给定一个视频文件的拆分模式 L , 按照一定规则, 将 $l(i)$ 安置到相应的模式分区中, 得到一个相应的存储模式, 仍记为 L , 这种方法叫做安置算法.

根据存储模式, 令 $t(i) = l(i)/r(z)$, 则用 $T = [t(1), t(2), \dots, t(N)]$ 表示时间检索模式. 一些文献^[8~10]专门研究

安置算法, 同样, 在以下的讨论中用文[10]的 Scaling 安置算法为研究基础.

3 平滑检索模型

根据文[1]及提供的 MPEG 数据源^[2, 11], 若拆分模式 L 由 GOP 单元构成, 则将 L 经 Scaling 算法分别作用于 CAD 和 MZ 磁盘后, 时间检索模式分布如图 2 所示. 可以看出, L 的分布特性决定 T 的分布性质, 尽管 MZ 磁盘特性对 L 有所中和, 但 T 中各 $t(i)$ 之间差距依然较大, 为改善 T 模式分布的不均性, 在这里引入平滑技术到磁盘调度中, 如图 1 所示, 并称之为平滑检索模型.

拆分模式 L 可以是以帧、GOP 或其它形式单元构成, 在这里是已知的, 如视频的帧播放序列. 在

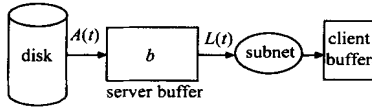


图 1 平滑检索模型

这里将时间离散化为 $\{1, 2, \dots, N\}$, 在 $L(t)$ 和 $A(t)$ 之间是一个起平滑作用的缓冲区 b , $l(i)$ 表示第 i 个时间单元应从 b 中发出的数据量, $L(i)$ 表示到第 i 时间单元时应从 b 中发出的数据总量, 满足关系 $l(i) = L(i) - L(i-1)$. 根据平滑的原理^[4], $U(i) = \min\{L(i-1) + b, L(N)\}$, $i \in \{2, 3, \dots, N-1\}$, 其中有 $U(0) = 0$, $U(1) = b$. 同样定义 $A = [a(1), a(2), \dots, a(N)]$ 为存储模式, $a(i)$ 表示第 i 个时间单元应到达 b 中的数据量, 根据定义 2 相应于 A 的 T 则为时间检索模式. 那么平滑检索算法定义如下.

定义 3(平滑检索算法) 给定一个视频的网络输出 L , 对于一个 b , 应用平滑算法, 得到一个的平滑拆分模式 A , 应用安置算法, 得到一个与 A 存储相应的时间检索模式 T , 并将 (b, A, T) 叫做三元组, 通过改变 b , 可以得到一组三元组, 在这些三元组中把具有最优时间检索模式 T^* 的叫最优三元组, 用 (b^*, A^*, T^*) 表示, 其中 A^* 为优化存储模式、 b^* 为最小缓冲代价. 把寻找 (b^*, A^*, T^*) 的方法叫做平滑检索算法 SRA(smoothing retrieval algorithm).

4 平滑检索算法

4.1 平滑性能的标准

根据 Majorization(以下简称 M) 定理^[12], 给定两个向量模式 X 和 Y , 若 Y majorizes X 或 $X < Y$, 则说明模式 X 比 Y 更平滑, 且具有下面两个性质:

性质 1: $\max\{x(i)\} \leq \max\{y(i)\}$.

性质 2: $\min\{x(i)\} \geq \min\{y(i)\}$.

MVBA 算法对于给定的一对上下限 $(L(t), U(t))$ 和缓冲 b , 能得出一个 M 特性最优的优化模式 A , 满足 $A < \{A\}$ (表示 A 在给定条件下是所有可行模式中 M 特性最好的一个).

让 $a_{\min}(A) = \min\{a(i)\}$ 和 $a_{\max}(A) = \max\{a(i)\}$, 根据 MVBA 算法, 给出如下结论.

结论 1: A_1, A_2 分别对应于 b_1, b_2 在 MVBA 下的优化模式, 若 $L_1 = L_2$, 当 $b_2 > b_1$, 有 $a_{\max}(A_2) \leq a_{\max}(A_1)$ 和 $a_{\min}(A_2) \geq a_{\min}(A_1)$.

证明: 让 $\Delta b = b_2 - b_1$, 有 $U_2(i) = U_1(i) + \Delta b$, $U_2(i)$ 线将会整体上移 Δb . A_1 是 (U_1, L_1) 和 b_1 下的优化模式, 由定义 1 知它也是 (U_2, L_2) 和 b_2 下的一个可行模式, $A_1 \in \{A_2\}$, 根据 MVBA 算法的性质, $A_2 < \{A_2\}$, 有 $A_2 < A_1$, 再由 M 的性质 1、2, 得到结论 1.

4.2 平滑检索算法 SRA

用符号 $t_{\max}(T)$ 表示时间检索模式 T 中最大单元, 下面的平滑检索算法是在一组可行的时间检索模式 $\{T\}$ 中找出一个 $t_{\max}(T)$ 具有最小值的优化元组 (b^*, A^*, T^*) . 算法的基本步骤是:

(1) 对于给定的网络输出模式 L , 设置一个初始的 $b_{\min} = \max\{l(i)\}$, 调用 MVBA 算法计算存储模式 A 和改变点集 I (见文[4]或[13]的定义), 由 A 和 Scaling 算法计算 T , 得到一个三元组 (b, A, T) 及 $t_{\max}(T)$, 并令它们为 (b^*, A^*, T^*) 及 $t_{\max}(T^*)$.

(2) 由 A 和 I , 调用文[13]算法, 建立 Q 表. Q 表由元素 $\langle i, b_i, f_i \rangle$ 组成, 其中 $i \in I$ 是一个改变点, b_i 表示缓冲尺寸, f_i 说明第 i 改变点的性质: 凸点或凹点^[4].

(3) 对 Q 表进行操作, 令 $b = \min\{b_i | i \in I\}$, 由 Q 表和 L 计算存储模式 A , 由 A 和 Scaling 算法计算 T , 得到新三元组 (b, A, T) 及 $t_{\max}(T)$. 若 $t_{\max}(T) < t_{\max}(T^*)$, 则 $(b^*, A^*, T^*) \leftarrow (b, A, T)$ 和 $t_{\max}(T^*) \leftarrow t_{\max}(T)$.

(4) 删除 Q 表中 b_i 和 b 有相同值的元素, 得到新的 Q 表. 若 Q 表中只剩下 $b_i = \infty$ 的元素项, 则输出 (b^*, A^*, T^*) , 终止算法的执行; 否则回到(3).

4.3 SRA 算法的可行性

对于 VBR 视频流服务, 磁盘的接纳计算通常是基于最坏情况的即以 $t_{\max}(T)$ 为计算条件, 上述算法以 $t_{\max}(T)$ 为判定条件, 寻找优化的三元组 (b^*, A^*, T^*) 具有实际意义, $t_{\max}(T)$ 越小磁盘能支持更多的实时流调度.

由结论 1, 当 $b_2 > b_1$, 由 MVBA 算法得到的两个优化模式满足 $A_2 < A_1$ (见结论 1 的证明), 作用于 CAD 磁盘时, 检索模式 $T_2 < T_1$ 成立; 但作用于 MZ 磁盘时, 由性质 1、2 知, 公式 $T_2 < T_1$ 不一定成立, 也就是说, 一个平滑的存储模式, 不一定能得出相应平滑的时间检索模式. 由文献[2]视频峰值率与谷值率之比在 10 以上, 而 MZ 磁盘的最外与最里磁道的传输率之比目前在 3 以下, 在平滑检索算法运行的初段中, $t_{\max}(T)$ 值首先来自 A 中的最大单元, 当增加时 (见算法中的第 3 步), 由结论 1, $t_{\max}(T)$ 是非递增的. 随 b 的不断增大, A 中大单元的尺寸在减小, 小单元尺寸在增加 (见结论 1), 这样 $t_{\max}(T)$ 可能来自其他磁盘区的块, 一旦这样, $t_{\max}(T)$ 实际上将不会再减小, 反而会回增 (不排除存在局部范围内的波动), 但为了得到最小的 $t_{\max}(T)$, 算法做完了所有可能的情况, 从中选取最小的. 所以平滑检索算法是可行的.

4.4 SRA 算法的性能

SRA 算法中, 第 1、2 步在时间 $O(N)$ 内完成, 第 3、4 步的时间复杂性为 $O(K \cdot N^2)$, 其中 K, N 分别是 Q 表和 A 的长度, $O(N^2)$ 项来自 Scaling 算法, 而实际上经过一遍排序后, 以后的

重排是在基本完全有序的情况下进行的, 这样算法的复杂度要比 $O(N^2)$ 好得多, 再说 SAR 算法是在离线进行的, 时间复杂度不是主要性能目标。

评价 SRA 算法的性能要综合看三个方面: 内存的占用、磁盘 I/O 带宽的利用率(极小化 $t_{\max}(T)$) 和磁盘存储空间利用率。三者之间是相互影响的, 单独提高某一方面的性能, 需牺牲其他性能作代价。下面分别说明。

磁盘空间的利用率: 内存和磁盘 I/O 的性能建立在 Scaling 的性能基础之上, 而 Scaling 算法的比例分配关系能保证各视频对象合理地使用磁盘, 不存在磁盘争用现象, 消除了不合理的竞争, 确保磁盘空间的完全利用^[10]。当 $t_{\max}(T)$ 来自非最快磁盘区的数据块时, 可以打破比例分配的限制, 将产生 $t_{\max}(T)$ 数据块上移到前一个更快的磁盘区, 进一步减小 $t_{\max}(T)$, 但这种结果将导致其它视频对象存储分配混乱、平滑检索性能变坏。

极小化内存的占用(或缓冲代价)是指对于一个给定的视频和检索模式它是一个最小的低限值, 这一点在算法的第(3)步循环中给出了保证, 也就是说, 找不出比 b^* 更少的 b 满足 T^* ^[13]。

极小化 $t_{\max}(T)$ 是指在给定的缓冲代价下, 在多个可行的检索模式中 $t_{\max}(T)$ 是最小的, 这一点由 MVBA 算法及它的 M 性质和 Scaling 算法可以证明。极小化的 $t_{\max}(T)$ 有高的磁盘 I/O 带宽的利用率 $\eta = \sum_1^N t(j) / N t_{\max}(T)$ (在最大带宽分配策略下), 见表 2, 利用率高说明 T 的分布越平滑。极小化的 $t_{\max}(T)$ 能提升视频服务器服务规模^[14, 15]。

5 实验结果

模拟实验中用 HP C2490A 磁盘提供的参数, 共 11 个分区, 用户数据传输率为 3624~5778KBps, CAD 磁盘的数据传输率取其平均值(根据文[8]这是目前最好的结果)。MPEG 视频数据源来自文[11], 每一个视频对象长 40000 帧, GOP 尺寸 12, 实验中以 GOP 为调度单元。图 2 给出了视频 dino 的原始压缩的数据在 CAD 上检索时间分布①, 及 $b^* = 0.74$ MB 时分别在 CAD 磁盘②和 MZ 磁盘③上检索时间分布图(其中分布①图示比例缩小了一倍), 曲线③比曲线②要平滑, 最大最小检索时间见表 2。表 1 给出了未平滑的视频数据分别作用于 CAD 磁盘和 MZ 磁盘的极大极小检索时间和磁盘 I/O 带宽的

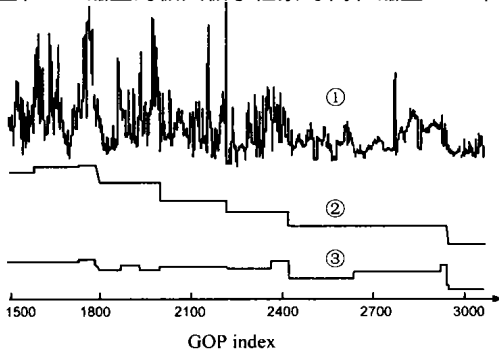


图 2 视频 dino 各时间检索模式分布图

利用率, 在 MZ 磁盘上, 最大检索时间缩减了 20%, 利用率提高了 5 个多百分点。表 2 给出了具有最小 $t_{\max}(T)$ 时的 b^* 值及该值下两种磁盘的极大极小检索时间和磁盘带宽利用率, 可以看出在 MZ 磁盘上极大检索时间缩减了 20%, 利用率提高了约 13 个百分点, 而要在 CAD 磁盘上取得 MZ 磁盘同样的效果, 其缓冲代价见表 2 中的最后一列。

表 1 未平滑下的磁盘检索结果

Video object	$t_{\max} \sim t_{\min}$ (ms)	η (%)	$t_{\max} \sim t_{\min}$ on MZ(ms)	η on MZ(%)
Terminator	10.85~0.68	32	8.84~0.85	38
Race	35.49~2.99	27	28.91~3.87	33
Dino	16.72~1.32	25	13.62~1.71	30
Mtv	38.83~0.72	16	31.64~0.93	20
Soccer	34.12~1.76	25	27.8~2.29	30
Asterix	28.75~0.82	25	23.42~1.07	30

表 2 极小化缓冲代价下的磁盘检索结果

Video object	$t_{\max} \sim t_{\min}$ (ms)	η (%)	$t_{\max} \sim t_{\min}$ on MZ(ms)	η on MZ (%)	b^* (MB)	b (MB)
Terminator	4.31~2.34	80	3.66~3.03	93	0.2	1.06
Race	13.64~6.84	72	11.14~8.5	86	1.01	1.57
Dino	5.38~2.46	79	4.41~3.02	93	0.74	3.59
Mtv	9.28~2.84	68	7.85~3.34	79	6.88	12.25
Soccer	12.36~6.45	70	10.15~7.74	83	0.62	2.65
Asterix	9.25~4.43	76	7.57~5.73	91	1.96	4.47

作者简介:

谢建国 男, 1964 出生于湖南祁阳, 副教授, 博士, 从事网络多媒体、网络优化等研究。

陈松乔 男, 1941 年出生于湖南长沙, 教授, 博士生导师, 从事软件工程、算法优化等研究。

陈建二 男, 1954 年出生于广西桂林, 教授, 博士, 博士生导师, 从事网络优化、网络安全等研究。

参考文献:

- [1] Rose O. Statistical properties of MPEG video traffic and their impact on traffic modeling in ATM systems [A]. Proceedings of the 20th Annual Conference on Local Computer Networks Minneapolis [C]. MN: 1995. 397-406.
- [2] 李生红, 刘泽民. MPEG 标准 VBR 视频业务新模型及其性能研究 [J]. 电子学报, 2000, 28(1): 42-45.
- [3] Chang Ray I, Chen Mengchang, et al. Optimizations of stored VBR video transmission on CBR channel [A]. Proc SPIE VVDC: performance and control of network systems [C]. 1997. 382-392.
- [4] Salehi J D, Zhang Zhi Li, et al. Supporting stored video: reducing rate variability and end-to-end resource requirements through optimal smoothing [J]. IEEE/ACM Transaction on Network, 1998, 6(4): 379-410.

(下转第 1241 页)

- 174.
- [2] Sidhu D, Fu T, Abdallah S, et al. Open shortest path first (OSPF) routing protocol simulation [A]. Computer Communication Review [C]. USA: Oct. 1993. 23(4): 53- 62.
- [3] Cain B. Fast link state flooding [A]. Proc of IEEE GLOBECOM' 00 [C]. NJ, USA: 2000. 465- 469.
- [4] Paxson V. End to end routing behavior in the internet [J]. Networking, IEEE/ ACM Trans, 1997, 5(5): 601- 615.
- [5] Wang J, Hao R, Wu J. TUGEN: an automatic test suite generator integrating data flow and control flow methods [A]. Proc of IEEE International Conference on Communications [C]. New York, USA: 1998. 1: 286- 290.
- [6] Bi J. The research on distributed routing protocol conformance test based on formal techniques [D]. Beijing, China: Dept. of Computer Science, Tsinghua Univ. 1999.
- [7] ISO 9646 [S]. Information processing systems, open system interconnection, OSI conformance testing methodology and framework. 1991.
- [8] OSPF routing protocol emulation software [EB/OL]. [http://www. ixr a. com/](http://www.ixr.a.com/).
- [9] The adtech AX/4000 broadband test system [EB/OL]. [http://www. adtech inc. com/ products/ ax4000. asp](http://www.adtechinc.com/products/ax4000.asp).
- [10] Agilent technologies' QA robot [EB/OL]. [http://advanced. comms. agilent. com/ qarobot/](http://advanced.comms.agilent.com/qarobot/).

- [11] Agilent routertester, internet scale simulation for gigabit and terabit routers [EB/OL]. [http://advanced. comms. agilent. com/ RouterTester/](http://advanced.comms.agilent.com/RouterTester/).
- [12] Rayner D. OSI conformance testing [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1987, 14(1): 79- 98.
- [13] Moy, J. OSPF version 2 [S]. IETF RFC2328, 1998.

作者简介:



崔 勇 男, 1976 年生于新疆乌鲁木齐, 博士研究生, 1995 年保送到清华大学计算机系读本科, 1999 年本科毕业后在该系直读博士学位, 研究领域包括计算机网络体系结构, 高速互联网路由体系结构, 路由协议的仿真、测试, 以及多目标优化的路由算法及其评价. Email: cy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn.



徐明伟 男, 1971 年生于辽宁朝阳, 博士, 副教授, 研究方向包括计算机网络体系结构, 计算机网络性能评价和协议测试.

(上接第 1237 页)

- [5] Zhang Junbao, Hui J. Applying traffic smoothing techniques for quality of service control in VBR video transmission [J]. Computer communication, 1998, 21(4): 375- 389.
- [6] Feng W, Rexford J. Performance evaluation of smoothing algorithms for the transmitting prerecorded VBR video [J]. IEEE Trans on Multimedia, 1999, (9): 302- 313.
- [7] Ruenmiller C, Wilker J. An introduction to disk drive modeling [J]. IEEE Computer, 1994, 27(4): 17- 28.
- [8] Ghandeharizadeh S, Kim S H, et al. Placement of continuous media in multi zone disks [J]. Multimedia Information Storage and Management, 1996: 23- 35.
- [9] Kang J, Yeom H Y. Storing VBR Data on MZR Disks [A]. In Proc of the International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video [C]. June 1999.

- 48- 52.
- [10] 谢建国, 陈松乔. VBR 视频在 MZR 磁盘上的比例安置 [J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(18): 22- 25.
- [11] MPEG trace [EB/OL]. [http://nero. informatik. uni wuerzburg. de/MPEG/trace](http://nero.informatik.uni-wuerzburg.de/MPEG/trace).
- [12] Marshall A W, Olkin I. Inequalities: Theory of Majorization and its Applications [M]. New York: Academic, 1979.
- [13] Sanjay G R, Raghavan S V. Fast techniques for the optimal smoothing of stored video [J]. Multimedia System, 1999(7): 222- 233.
- [14] 谢建国, 陈建二, 等. 视频服务器中多网络 I/O 的调度与接纳控制 [J]. 软件学报, 2002. 8.
- [15] 林亚平, 程友清. 因特网上视频多点传输算法研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(11): 1503- 1506.