

基于 VBR 视频流量预测技术的 DVB-H 复用器调度算法

王 斌¹, 戴琼海^{1,2}, 丁 嵘²

(1 清华大学深圳研究生院宽带与多媒体重点实验室, 广东深圳, 518055

2. 清华大学自动化系宽带网数字媒体实验室, 北京 100084)

摘 要: DVB-H 采用的时间分片技术对现有的复用器算法提出了挑战. 本文在 VBR 视频流量预测技术的基础上提出了基于 VBR 视频流量预测技术的 DVB-H 网络复用器调度算法. 本算法根据 VBR 视频码率的预测值, 预先分配下一调度周期的带宽, 满足了时间分片技术对复用器调度算法的要求. 与 CBR 调度算法相比, 本算法具有较小的时延和较高的带宽利用率.

关键词: DVB-H; NLM S; 调度算法

中图分类号: TN 943 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 08-1522-04

Scheduling Algorithm Based on VBR Video Traffic Prediction for TS Multiplexers in DVB-H Networks

WANG Bin¹, DAI Qiong-hai^{1,2}, DING Rong²

(1 Shenzhen Key Laboratory of Broadband & Multimedia, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong

518055, China; 2. Broadband Networks & Digital Media Lab of Automation Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A challenge was brought to the scheduling algorithm of TS multiplexers by time-slicing technology adopted in DVB-H. We propose a scheduling algorithm based on variable bit rate (VBR) video traffic prediction for TS multiplexers in DVB-H networks. This algorithm allocates the bandwidth of next scheduling cycle in advance by the prediction of VBR video traffic, and meets the requirement about scheduling algorithm needed by the technology of time-slicing. Our scheduling algorithm can achieve significantly lower delay and higher utilization of bandwidth in comparison with CBR scheduling algorithm.

Key words DVB-H; NLM S; scheduling algorithm

1 引言

DVB-C^[1]、DVB-S^[2]、DVB-T^[3]等现有数字电视系统只能提供单向视频广播服务, 而 DVB-H^[4]则在融合移动通信技术 (GPRS、CDMA、3G 等) 的基础上为手持终端用户提供双向、交互式移动视频广播服务. DVB-H 的出现为手持移动视频业务开辟了一个新的发展空间.

与现有的统计复用技术不同 (如图 1 调度周期为 T), 时间分片技术要求 DVB-H 网络复用器发送的节目数据流中必须包含下一调度周期内该节目时间分片的起始时间信息, 即要求复用器算法必须预先分配下一个调度周期的带宽. 现有复用器调度算法可分为 CBR 调度算法^[5]和 VBR 调度算法^[5-7]两大类. CBR 调度算法根据节目的平均码率按比例各路节目分配固定带宽, 而 VBR 调度算法则在每个调度周期开始时为各路节目动态分配带宽. CBR 调度算法传输时延大, 带宽利用率低; VBR 调度算法

虽然传输时延小, 带宽利用率高, 但无法预先分配下一调度周期的带宽, 因此现有复用器调度算法无法有效解决 DVB-H 网络复用器的带宽分配问题.

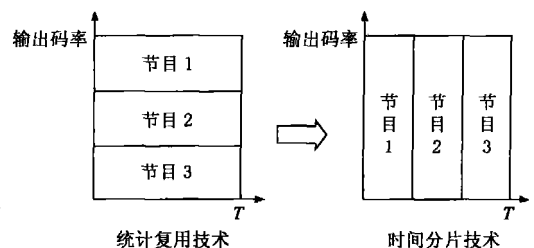


图 1 DVB-H 与现有数字电视网络复用技术的比较

本文在现有的 VBR 视频流量预测技术^[8-12]的基础上提出了新的 DVB-H 复用器调度算法. 与视频数据流相比, 音频数据流码率低且抖动小, 因此视频数据流是影响复用器带宽分配的主要因素, 故本文中的 DVB-H 复用器调度

收稿日期: 2004-11-25 修回日期: 2006-03-14

基金项目: 国家重点自然科学基金 (No. 60432030); 国家杰出青年科学基金 (No. 60525111)

算法采用自适应 NLM S 线性预测器^[8-10]预测 VBR 视频流码率, 并根据预测值预先分配下一调度周期的带宽。

2 DVB-H 复用器调度算法

在 DVB-H 复用器中, 由于各路节目在发送时占用整个输出带宽, 如果确定了各路节目的发送次序和发送时间, 就确定了带宽分配。

TS 包是复用的基本单位, 复用器发送一个 TS 包所需时间 (Sb_t) 为:

$$Sb_t = 188 \times 8B \quad (1)$$

式中: B 为复用器的输出带宽, 因此本文中的复用器输出带宽可用一个调度周期内能发送的 TS 包数 (N) 来表示:

$$N = T / Sb_t \quad (2)$$

复用过程中, 往往会出现一路或多路节目所分配的带宽过剩的情况, 究其原因主要有两种:

(1) 输出带宽过剩。由于 VBR 视频流的码率抖动剧烈, 为了保证传输质量, 输出带宽会留有一定的冗余。

(2) 预测器对视频流码率预测过高, 造成分配给这路节目的带宽过剩。

如果分配带宽过剩, 则发送当前调度周期内接收的 TS 包以提高网络带宽的利用率, 并可在一定程度上缓解由于输入总码率抖动造成的码流传输时延和复用器缓冲区增加。

2.1 单步预测器

MPEG 编码标准中包含三种不同类型的数据帧: I 帧、P 帧和 B 帧, 不同类型的数据帧具有不同的统计特性, 因此对 MPEG VBR 视频流的码率预测有 I、P、B 帧分开预测和 GOP 预测两种方式^[8]。如果采用 I、P、B 帧分开预测方式, 则每路节目则需要三个预测器, 大大增加了复用器算法的复杂度, 并且在 DVB-H 中终端每次开机时的同步时间大约需要 $200\text{ms} \sim 250\text{ms}$ ^[13], 因此要求复用器的调度周期较长 (意味着时间分片周期也较长), 故本算法采用 GOP 预测方式, 并且选择 GOP 周期为其调度周期。

本算法选用结构简单、预测精度高的自适应 NLM S 线性单步预测器^[8-10]来预测 VBR 视频流码率。一个 P 阶的单步 NLM S 的预测器可表示为:

$$\hat{x}(n+1) = \mathbf{W}_n^T \mathbf{X}(n) \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{X}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)]^T$$

$$\mathbf{W}_n = [w_n(0), w_n(1), \dots, w_n(p-1)]^T$$

$$\text{预测误差 } e(n) = x(n+1) - \hat{x}(n+1),$$

\mathbf{W}_n 的更新公式为:

$$\mathbf{W}_{n+1} = \mathbf{W}_n + \mu \times e(n) \frac{\mathbf{X}(n)}{\|\mathbf{X}(n)\|^2} \quad (4)$$

式中: $\|\mathbf{X}(n)\|^2 = \mathbf{X}(n)^T \mathbf{X}(n)$ 。当 $0 < \mu < 2$ 时, NLM S 算法收敛。

NLM S 自适应线性预测器需要 p 个初始数据, 如果复

用器在接收到 p 个 GOP 后才进行视频流的码率预测和带宽分配, 则会增加复用器缓冲区长度并造成较大的传输时延, 因此采用均值法对单步 NLM S 自适应线性预测器的初始数据进行估计。均值法用接收到的 GOP 数据量的均值来估计下一个 GOP 的数据量, 因此复用器只需缓冲初始 GOP, 大大减小了复用器缓冲区的长度和传输时延。对于本调度算法中的 P 阶单步预测器其初始数据的均值预测算法如下:

$$\hat{x}(n+1) = \frac{\sum_{i=0}^n x(i)}{n+1}, \quad 0 \leq n < (p-1) \quad (5)$$

由于 NLM S 预测器的自适应特性, 其初始数据的均值预测误差只会影响预测器最初的预测精度, 不会对预测器的收敛性造成影响。

在本调度算法的 NLM S P 阶单步预测器中, $\mathbf{X}(n)$ 和 $\mathbf{W}(n)$ 的初始值分别取:

$$\mathbf{X}(p-1) = [x(p-1), x(p-2), \dots, x(0)]^T$$

$$\mathbf{W}_{p-1} = \left[\frac{1}{p}, \frac{1}{p}, \dots, \frac{1}{p} \right]^T$$

DVB-H 根据 MPE (Multiplex Protocol Encapsulation)^[13] 和 MPEG-2 系统层标准来封装服务数据。如果知道一个 GOP 的数据量, 则可计算出此 GOP 封装成 TS 包后的 TS 包数, 因此在本文的调度算法中用 TS 包数来表示 GOP 数据量。

2.2 调度周期内的数据发送量

在第 n 个调度周期开始时, 本算法根据第 $n+1$ 个调度周期开始时各路节目需要发送的 TS 包数 ($N_i(n+1)$, i 为节目编号) 来分配第 $n+1$ 个调度周期的带宽。由于在第 n 个调度周期开始时无法得知 $N_i(n+1)$, 故用其预测值 $PN_i(n+1)$ 来代替:

$$PN_i(n+1) = B_i(n) + PF_i(n+1) - PT_i(n) \quad (6)$$

公式 (5) 中, $B_i(n)$ 为第 n 个调度周期开始时复用器中第 i 路节目缓冲区的长度。由于复用开始前缓冲了一个 GOP, 因此复用器会在第 n 个调度周期内收到所复用节目的第 $(n+1)$ 个 GOP。 $PF_i(n+1)$ 为第 i 路节目的第 $(n+1)$ 个 GOP 的 TS 包数的预测值。由于音频数据流的码率低且抖动小, 因此本算法用 $PF_i(n+1)$ 估计复用器在第 n 个调度周期内收到的第 i 路节目的 TS 包数。 $PT_i(n)$ 为复用器在第 n 个调度周期内发送的第 i 路节目 TS 包数的预测值。

在计算 $PT_i(n)$ 时, 假设各路节目在调度周期内以恒定码率向复用器发送 TS 包, 则 $PT_i(n)$ 的计算公式如下:

$$PT_i(n) = \begin{cases} A_i(n), & (B_i(n) + (ST_i(n) - n \cdot T) \frac{PF_i(n+1)}{T}) \geq A_i(n) \\ B_i(n) + \frac{(ST_i(n) - n \cdot T) PF_i(n+1) + B_i(n) \cdot T}{N - PF_i(n+1)}, & \\ \frac{PF_i(n+1)}{T}, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $A_i(n)$ 为复用器在第 n 个调度周期内分配给第 i 路节目的带宽(用 TS 包个数来表示). $ST_i(n)$ 为第 i 路节目在第 n 个调度周期内的时间片的起始时间. 为了表叙方便, 设置复用的开始时刻 $t_{start} = 0$

2.3 调度周期内的带宽分配

在第 n 个调度周期开始时, 根据第 $(n+1)$ 个调度周期需要发送的数据量来预先分配第 $(n+1)$ 个调度周期的带宽, 则分配给第 i 路节目的带宽为:

$$A_i(n+1) = \begin{cases} N \cdot \frac{PN_i(n+1)}{\text{Sum}}, & N \leq \text{Sum} \\ N_i(n+1) + \frac{N - \text{Sum}}{n_0}, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\text{Sum} = \sum_{i=1}^{n_0} PN_i(n+1)$

2.4 Δt 计算

复用开始前, 需要设定 n_0 路节目的发送次序, 为了方便起见按节目编号依次发送.

在带宽分配完成后, 各路节目在第 $(n+1)$ 个调度周期内的发送时间如下:

$$ST_i(n+1) = \begin{cases} (n+1)T, & i = 1 \\ (n+1)T + Sbt \sum_{k=1}^{i-1} A_k(n+1), & 2 \leq i \leq n_0 \end{cases} \quad (9)$$

则 $\Delta t_i(n+1)^{[13]}$ 为:

$$\Delta t_i(n+1) = ST_i(n+1) - ST_i(n) \quad (10)$$

2.5 复用器调度算法

复用开始前, 需要对复用器调度算法进行初始化, 如下式:

$$B_i(0) = F_i(0), \quad i \in n_0 \quad (11)$$

$$\text{Sum}_0 = \sum_{i=1}^{n_0} F_i(0), \quad i \in n_0 \quad (12)$$

$$A_i(0) = N \cdot \frac{F_i(0)}{\text{Sum}_0}, \quad i \in n_0 \quad (13)$$

$$ST_i(0) = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ Sbt \cdot \sum_{k=1}^{i-1} A_k(0), & 2 \leq i \leq n_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $B_i(0)$ 为在初始调度周期开始时复用器中第路节目缓冲区的长度, $F_i(0)$ 为第 i 路节目初始 GOP 的 TS 包数, $A_i(0)$ 为复用器在初始调度周期内分配给第 i 路节目的带宽. $ST_i(0)$ 为第 i 路节目在初始调度周期内的时间分片的起始时间. Sum_0 是初始调度周期开始时复用器需要发送的 TS 包数总和.

复用器的调度算法如 Scheduling() 所示:

Scheduling()

```
{
步骤 1 预测复用器在当前调度周期内收到的各路项目
GOP 的 TS 包数 (PFi(n+1));
```

```
步骤 2 预测在当前调度周期内发送的各路节目的 TS 包
数 (PTi(n));
```

```
步骤 3 进行下一调度周期的带宽分配
```

```
步骤 4 计算下一调度周期内各路节目的发送时间
(STi(n));
```

```
计算  $\Delta t_i(n+1)$  将其插入相应节目的数据流中; 按
STi(n) 发送各路节目的 TS 包;
```

```
发送完成后返回第一步;
```

```
}
```

如果调度算法的运算时间 $t_{sch}(n) \leq (ST_2(n) - n \cdot T)$, 可通过并行计算和在每个调度周期开始时立即发送第一路节目的方式来消除 $t_{sch}(n)$ 造成的复用延时.

3 仿真结果

为了验证本文 DVB-H 复用器调度算法的性能, 我们进行了视频节目的复用仿真实验. 我们从“星空卫视”数字卫星频道的电视节目截取了 6 段 MPEG-2 视频, 分辨率为 544×576 帧率为 25 帧/秒. 为了适应手持终端应用, 我们对截取的视频节目进行转码处理, 转码后的视频节目分辨率为 128×144 每段视频节目包含 200 个 GOP, GOP 的视频序列如下: IBBPBB-PBBPBB. 输出带宽为 6.4M bps, 6 路节目的总平均码率为 5.31 M bps 如图 2

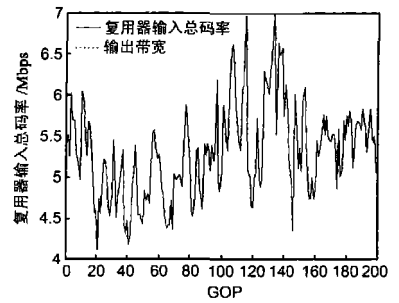


图 2 复用器的输入总码率

为了描述复用器对节目传输造成的延时, 定义复用延时 $t_{MD}, t_{MD} = t_{OUT} - t_N$, 式中 t_N 是复用器接收完一个 GOP 所有

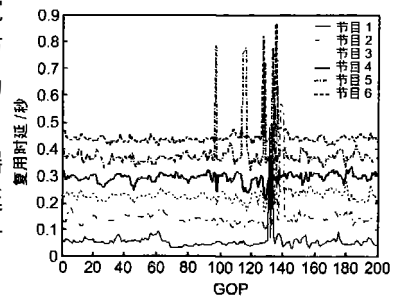


图 3 基于 VBR 视频流量预测技术的 DVB-H 复用器调度算法的复用延时

TS 包的时间, $t_N = n \cdot T (n \geq 0)$; t_{OUT} 是复用器发送完相应 GOP 所有 TS 包的时间. 在复用器中, $t_{MD} \leq T$ 表示复用器可在一个时间分片内(即一个调度周期内)将一个 GOP 的 TS 包全部发送出去, t_{MD} 的剧烈抖动往往会造成客户端缓冲区的下溢或上溢, 降低数字电视节目的服务质量.

分别采用本文的 DVB-H 调度算法和 CBR 算法进行仿真, 仿真结果如图 3. 4 本文的 DVB-H 调度算法中的 NLM 预测器为 8 阶预测器, 步长 $\mu = 0.5$

在图 3 中, t_{MD} 抖动主要由两种情况引起: (1) 某段时间

内节目的输入总码率急剧上升, 并超过输出带宽. 由于码流复用的统计特性, 第一种情况出现的概率会随着复用节目数的增加而降低. (2) 预测器对视频数据流码率的预测值过低造成分配给节目的带宽不足. 提高预测器精度可以降低第二种情况出现的概率.

在图 4 中, t_{MD} 抖动是由节目码率超过分配的带宽引起的. 通常节目码率抖动越大, t_{MD} 的抖动越剧烈. t_{MD} 的标准偏差代表了 t_{MD} 抖动的剧烈程度, 统计数据如表 1:

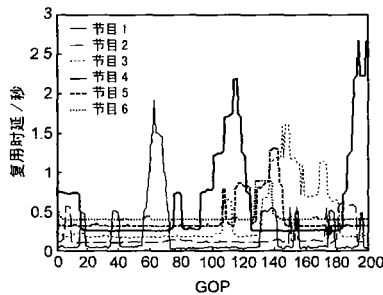


图 4 CBR 调度算法的复用时延

表 1 传输时延标准偏差

| 节目编号 | 基于 VBR 视频流量预测技术的 DVB-H 复用器调度算法 | CBR 调度算法 |
|------|--------------------------------|----------|
| 1 | 0.0445 | 0.3452 |
| 2 | 0.0608 | 0.1348 |
| 3 | 0.0343 | 0.3683 |
| 4 | 0.0185 | 0.5946 |
| 5 | 0.0700 | 0.2237 |
| 6 | 0.0426 | 0.1113 |

仿真结果表明, 基于 VBR 视频流量预测技术的 DVB-H 复用器调度算法的复用时延标准偏差远远小于 CBR 调度算法的复用时延标准偏差.

4 总结

现有复用器调度算法不能有效的解决 DVB-H 复用器的带宽分配问题, 因此本文在 VBR 视频流量自适应 NLM S 预测技术的基础上提出了新的 DVB-H 复用器的调度算法. 根据预测器对节目码率的预测值, 预先分配下一个调度周期的带宽, 并计算出下一个调度周期内各路节目时间分片的起始时间. 为了降低了节目的传输延时和复用器的缓冲区长度, 我们还采用均值法对 NLM S 预测器需要的初始数据进行估计.

仿真结果表明, 本算法在实现预先动态分配下一调度周期带宽的同时, 减小了复用时延抖动, 并且降低了缓冲区溢出的出现几率.

参考文献:

[1] ETSI Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure channel coding and modulation for cable systems [S]. ETSI standard EN 300 429, 1998

[2] ETSI Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services [S]. ETSI standard EN 300 421, 1997

[3] ETSI Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure channel coding and modulation for digital terrestrial television [S]. ETSI standard EN 300 744, 2001

[4] ETSI Digital Video Broadcasting (DVB): Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H) [S]. ETSI standard EN 302 304, 2004

[5] Du Jianhong, Xu Zhongyang, Chen Hao and Ding Hui. Scheduling algorithm for MPEG-2 TS multiplexers in CATV networks [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2000, 46(4): 294-295

[6] Ying-Dar Lin, Chun-Mo Liu. A timestamp-sensitive scheduling algorithm for MPEG-2 multiplexers in CATV networks [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 1998, 44(3): 336-345

[7] Mehrihan Azimi, Panos Nasiopoulos, Rabab Ward. A scheduling scheme for multiplexing of VBR sources in digital TV systems [J]. IEEE ICIP, 2002, (3): 173-176

[8] Abdelhaseem Mohamed, A. Das. Using adaptive linear prediction to support real-time VBR video under RCBR network service model [J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 1998, 6(5): 635-644

[9] Sang-Jo Yoo. Efficient Traffic Prediction scheme for real-time VBR MPEG video transmission over high-speed networks [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2002, 48(1): 10-18

[10] S Haykin. Adaptive Filter Theory [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991

[11] S Chong, San-qi Li, Joydeep Ghosh. Predictive dynamic bandwidth allocation for efficient transport of real-time VBR video over ATM [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(1): 12-23

[12] Xinyu Wang, Souhwan Jung, James S Meditch. Dynamic bandwidth allocation for VBR video traffic using adaptive wavelet prediction [A]. Proc. IEEE Intl Conf on Communication [C]. Atlanta, GA, USA: 1998, 549-553

[13] ETSI Digital Video Broadcasting (DVB): DVB specification for data broadcasting [S]. ETSI standard EN 301 192, 2004

作者简介:

王 斌 男, 1979 年 5 月出生于湖南常德. 现为清华大学自动化系硕士研究生, 目前研究方向为 DVB-H 复用算法、PDC. E-mail: wangbcn02@mails.tsinghua.edu.cn

戴琼海 男, 1964 年 12 月 26 日生, 博士, 清华大学教授, IEEE Senior Member. 主要研究方向为视频处理及通信, 目前研究的课题包括光场及其立体视频、可伸缩视频编码、分布式编码和无线视频传输. E-mail: qhda@mails.tsinghua.edu.cn