

视频通信中 MPEG-2 码流的纠错与自适应错误隐藏算法的研究

高 鹏 陈咏恩

(同济大学电子与信息工程学院 上海 200092)

摘 要 MPEG-2 的视频压缩算法,由于使用了可变长编码使其对信道错误十分敏感。利用视频图像在空间上和时间上的相关性对错误进行隐藏是图像通信中所特有的错误恢复措施。本文首先分析了 MPEG-2 的语法数据结构,并讨论了视频头纠错,基于空间的错误隐藏和时间隐藏算法的特点和适用范围,最终提出了视频头纠错和自适应错误隐藏的方法。通过实验对算法进行了验证,取得了满意的效果。

关键词 MPEG-2, 自适应错误隐藏, 纠错, 视频通信

Research on Error Correct and Adaptive Error Concealment Algorithm for MPEG-2 in Video Communication

GAO Peng CHEN Yong-En

(Department of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The MPEG-2 compression algorithm is very sensitive to channel error due to the use of variable-length coding. Error concealment method that utilizes the spatial and temporal redundancies of video is an own error resilience of video communication. At first, this paper studies the data structures and syntax of MPEG2. The performance of error concealment of spatial interpolation, temporal replacement and header error correct are also discussed. Finally, it gives a solution for header error correct and adaptive error concealment. The proposed approach is tested by experiments and good result is gained.

Keywords MPEG-2, Adaptive error concealment, Error correct, Video communication

1 引言

作为通用的视频压缩国际标准 MPEG-2 在 DVD, 数字电视领域得到了广泛的应用。随着数字通信的蓬勃发展, MPEG-2 标准将其应用延伸到视频会议, 多媒体通信, 数字视频广播(DVB)等领域。

MPEG-2 标准采用了可变长编码(Variable Length Coding), 离散余弦变换(Discrete Cosine transform)和运动补偿技术来压缩视频码流^[1], 具有严格的语法结构和编码规则。由于可变长编码的使用, 使得 MPEG-2 视频码流对于信道错误十分敏感, 一个比特的错误就有可能造成图像质量的严重下降^[2]。

利用图像通信本身的特点, 在视频解码端进行纠错和错误恢复是解决视频传输中误码的途径之一。由于 MPEG-2 视频码流在空域、时域和频域(DCT)中都存在冗余度。因此在错误发生时, 可以利用这些冗余度来隐藏错误, 而不会给信道增加传输内容。所以研究视频解码端的纠错和错误隐藏算法是十分必要的。

本文从两个方面切入问题: 首先针对 MPEG-2 的语法结构, 分析了各层的语法特点, 提出了对应的纠错控制算法。然后介绍了错误隐藏算法, 并且最终采用自适应错误隐藏算法。将这两个方面的研究成果结合起来, 应用在实际的设计中, 经过计算机仿真, 得到了较为满意的效果。

2 MPEG-2 语法结构分析及视频头纠错

MPEG-2 视频码流分成六层: 视频序列(sequence), 图像组(gop), 图像(picture), 片(slice), 宏块(Macro-block)和块(block)^[1], 如图 1 所示。具有明显的结构层次, 从而为视频

数据的错误定位和错误隐藏提供了良好的条件。

最高层是序列层, 包含有若干的图像组, 在每一个图像组中至少含有一个 I 帧和若干的 P, B 帧。图像组是一组相对独立的视频帧, 每次传输一个图像组就相当于对视频图像进行一次刷新, 这样一个图像组的错误不会传播到下一个图像组中, 这样可以有效地限制错误的传播。

编码帧由片层构成, 片层是视频层次结构中最小的同步单元。片层里包含若干的宏块, 一般来说片层包含图像一行中的所有宏块。一个宏块包含四个亮度块和若干色度块。宏块是运动补偿的最小单位, 在错误隐藏技术中, 无论采用空域错误隐藏还是时域错误隐藏, 都是将宏块作为错误隐藏的基本单位。

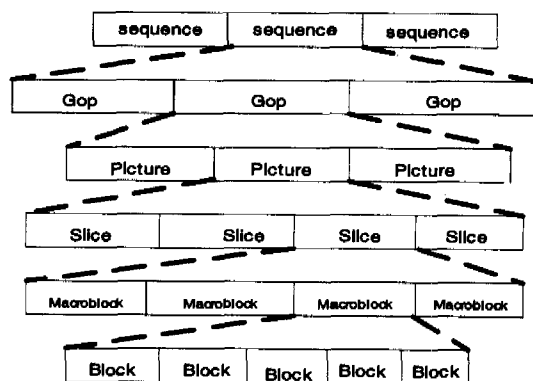


图 1 MPEG2 数据结构

在视频传输中, 例如在 ATM 网络中传输, MPEG-2 宏块以上层作为重要的数据信息得到重点保护, 错误率要远远低

高 鹏 博士生, 研究方向为视频解码及其 VLSI 的实现; 陈咏恩 博士生导师, 教授, 研究方向为数字通信, 数字视频广播(DVB)。

于码流中的其他数据,但是一旦这些数据出错,结果是非常严重的,往往可能会造成整幅图像,或者图像的一行解码错误,直到下一个重复层的到来后才会恢复。所以研究这部分数据的错误纠正算法还是很有必要的。

码流对应错误的影响范围将被限制在对应的层内,在下面提出的纠错算法主要是针对宏块以上部分,即片层和片层以上的部分而言,宏块级错误将由错误隐藏处理。

2.1 图像层以上及图像层错误分析和容错算法研究

序列层是视频流的最顶层,在序列头中规定了视频的图像分辨率、视频缓冲区大小、视频格式等语法元素。序列层的错误,有可能会引发解码图像高度和宽度错误,视频缓冲区上下溢出,显示颜色的错误,或者分级类型错误导致图像不能解码。

图组层语法元素有起始码,时间编码,close_gop,broke-link。后两个语法元素对于B帧的解码起重要作用。

图像头里主要的的数据是图像开始码,图像编码类型,VBV延时等。如果这些数据发生错误,会导致图像被错误解码,也可能造成缓冲区的上溢和下溢。

对于这几层的语法元素来说,由于都是一些固定的参数和标志位,可以采用图2的结构对这几层参数的数据进行纠错,算法如下:

- 1 在解码视频码流时,将这几层第一次解码的数据分别送入校验缓冲区I和系统缓冲区,第二次解码的数据和校验缓冲区I里的数据进行比较,如果校验正确送入校验缓冲区II,如果错误,重复操作,直到数据正确,进入步骤2。
- 2 对于后续重复的系统参数数据,使用校验缓冲区II的数据进行校验,判断是否出现错误,如果数据正确就不进行纠错,如果发现有错误,进入步骤3。
- 3 将该系统参数和校验缓冲区I进行校验,进一步确定错误的存在,根据不同数据采用不同方法对数据进行纠错,纠错完毕后,返回步骤2。

每一次视频码流更换,重新开始,校验缓冲区I、II的数据得到更新,不过该算法对起始头码错误无法纠错(事实上,目前还没有任何一种算法可以对起始头错误进行纠错),并且只对序列中那些恒定不变或者有规律的参数有效,对某些会频繁变化的参数(例如在图层的picture_coding_type图像编码类型,每一幅图都可能不同)是无法纠错的。

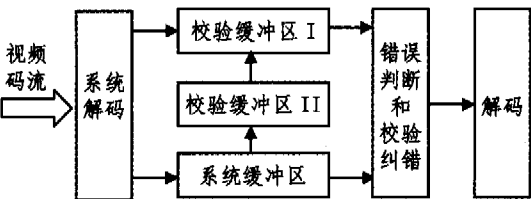


图2 序列层数据检验与纠错

2.2 片层的错误检测与错误处理控制算法

片层作为MPEG-2解码的最小的同步单位,需要在这一层进行错误检测并定位错误的位置,为接下来的错误隐藏提供先决条件。错误检测可以分成三个部分,如图3所示。首先要进行同步检测,如果找不到同步字(0x00000101—0x000001AF),则说明该片出错。其次是可变长编码的语法检测,MPEG-2码流采用可变长编码,在宏块解码时,对于宏块信息,各个块的DCT系数进行可变长解码,从MPEG-2标准码表中查找对应码值,如果无法找到对应的码字,则说明该宏块出现了错误。最后,如果可变长码表将码字错误映射成

为另外的码字,通过数据检测发现错误,具体方法是比较有可能出错的宏块和其他相邻宏块的边界差异,通过边界差异来判断。

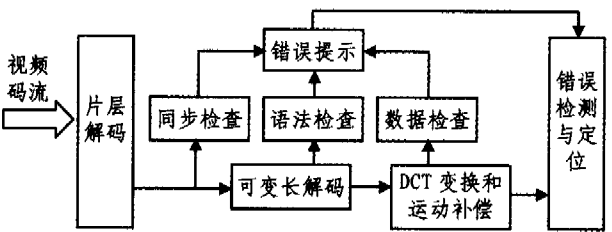


图3 错误检测

一旦检测到有错误宏块之后,解码器会记录错误位置,通过片同步,同步到下一个片层。但这样会造成当前片层所有剩余宏块数据全部丢失,而其中很可能包含正确宏块部分,会造成数据信息的浪费。针对这一问题本文提出了一种宏块级的重新同步策略,只须丢弃错误宏块信息,其他宏块信息还可以正常解码。

- 1 在检测到了错误宏块后,解码器在当前位置向后移动一比特,按照解码正常宏块的动作进行解码。
- 2 重复当前的动作,直到有宏块被正确解码。在这里我们认为只要在这一宏块中所有可变长码在解码表中可以找到对应的值,并且宏块中每一个块的DCT系数个数正确(64个),就认为该宏块解码正确。

3 MPEG-2 视频错误隐藏

在前面的部分中,错误检测部分一旦发现了任何的宏块错误,解码器需要作好记录并定位宏块位置,然后就要对该错误宏块进行错误隐藏。

3.1 错误隐藏算法的介绍

在过去的十几年内已经研究出了许多错误隐藏算法,概括起来可以分成空域法,时域法和频域法三类。

空域错误隐藏是利用视频图像在空间上的相关性进行错误恢复的隐藏方法。图4描述了经典的空域线形内插算法^[3],该算法使用顶部和底部的最为靠近错误宏块的两个像素内插得到丢失的像素。如图4,错误宏块的每一个像素可以根据下列内插公式给出, $B(x,y)=\frac{d_B}{d_l}B_T(n-1,y)+\frac{d_T}{d_l}B_B(0,y)$,其中 $B_T(n-1,y)$, $B_B(0,y)$ 分别是表示丢失块B的顶部,底部领域块的最后一行和第一行的像素值,d_l是丢失块的垂直尺寸,d_B和d_T是像素B(x,y)到B_B(0,y)和B_T(n-1,y)的距离。其他的空域法基本上都是对这个算法进行优化和改进的。

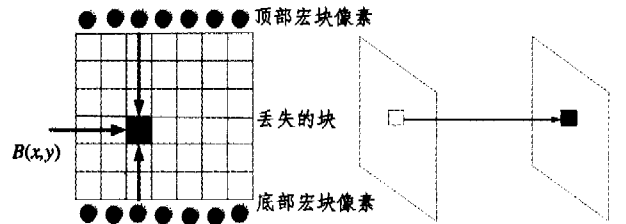


图4 空域线形内插算法 图5 时域替代算法

时域错误隐藏是基于图像在时间上相关性而进行错误恢复的一种方法,最为简单的时域算法如图5所示。采用时域替代错误隐藏,当前错误宏块的位置采用相邻帧中同样位置

的宏块信息进行取代。当然也可以估算丢失宏块的运动向量,取相邻宏块的中值作为丢失宏块的运动向量^[3],效果更佳,但如果丢失宏块是I帧中的宏块,由于相邻块无运动向量的信息,那么估算运动向量将无法使用,只能采用时域替代方法。

频域估计法是从正确接收到邻域宏块的DCT系数,估算丢失宏块的DCT系数^[4,5],应用和效果不如前两种方法。

3.2 空域和时域的自适应错误隐藏

上述的几种错误隐藏算法具有不同的特点和适用范围,在不同的环境下,错误隐藏的效果也各不相同。空域、时域之间的混合使用可以补充彼此产生的缺点^[6]。例如在P、B帧中采用空域内插法可以消除由时域法而产生的边界效应(通过运动补偿的块和邻域块之间有不光滑的连接),而在I帧采用时域法可以实现运动目标的复原。所以在本文中,根据图像自身的特点,采用自适应错误隐藏方法,达到较好的错误隐藏效果。

I帧的错误隐藏 I帧图像采用帧内编码模式,编码宏块不含有运动矢量,在场景不发生变化的情况下,帧和帧之间有较强的相关性。由于在MPEG-2图像中,错误宏块的左右邻域宏块常常也是错误的,因此正确接收的邻域宏块信息一般只有顶部宏块和底部宏块。对于I帧,我们采用如下自适应错误隐藏算法,该方法通过测量图像该区域的活动性,来确定需要采用空域法还是时域法。如图6所示,M表示错误的宏块,Mt,Mb分别表示该宏块同一幅图像里的顶部和底部的宏块,MR,MRt,MRb,表示相应的参考帧的对应宏块。采用如下的算法:

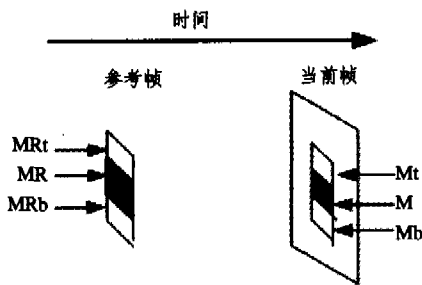


图6 自适应错误掩盖方法

1 计算顶部宏块Mt和底部宏块Mb的均方误差,也就由下面的公式(其中N=16是宏块长度,x,y表示错误宏块左上角像素在图像中的坐标,I(m,n)表示图像中该点的像素值)得到最小均方值MSE1

$$MSE1^2 = (\sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y-N}^{y-1} |I(m,n) - I(m,n+2N)|^2)$$

2 在参考帧中,计算MRt和Mt以及MRb和Mb的最小均方值,得到MSE2:

MRt和Mt的最小均方值

$$MSET^2 = (\sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y-N}^{y-1} |IR(m,n) - I(m,n)|^2)$$

MRb和Mb的最小均方值

$$MSEB^2 = (\sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y+N}^{y+2N-1} |IR(m,n) - I(m,n)|^2)$$

$$2 \times MSE2^2 = MSET^2 + MSEB^2$$

3 比较MSE1和MSE2的大小,如果MSE1小于MSE2,使用空域内插法进行错误隐藏,否则使用无运动补偿的时域替代法来实现宏块错误隐藏。

P、B帧的错误隐藏 对于P、B帧中的错误宏块,计算帧间的最小均方预测误差MSE,以P帧为例

$$MSET^2 = (\sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y-N}^{y-1} |IR(m,n) - I(m,n)|^2)$$

$$MSEB^2 = (\sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y+N}^{y+2N-1} |IR(m,n) - I(m,n)|^2)$$

$$MSE^2 = (MSEB^2 + MSET^2) / 2$$

很显然,如果帧间预测成功,那么MSE值就小,如果处于一个场景切换剧烈的情况下,MSE值就大,我们设定一个门限值为T,MSE大于T的时候,采用空域内插错误隐藏法,MSE小于T的时候,利用临近宏块的运动矢量,首先估算出当前错误宏块的运动矢量。采用有运动补偿的时域隐藏算法。

图7为算法框图。

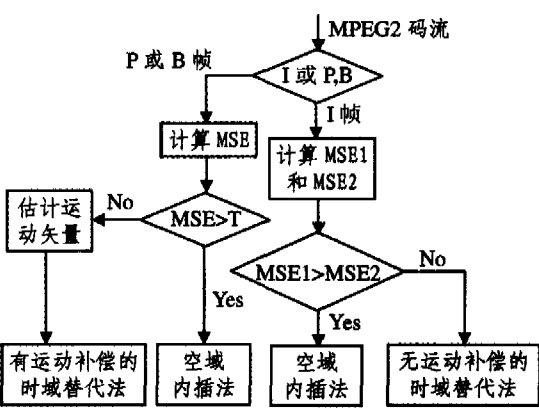


图7 算法框图

4 计算机仿真及结果

综合采用本文所给出的纠错和错误隐藏自适应算法,应用在设计当中,使用了4组标准MPEG-2视频码流,为了对不同的情况进行测试,评估算法的好坏,分别采用了快速运动,缓慢运动等序列码流。然后使用C语言给这四组MPEG-2压缩码流加入随机错误,测试出没有采用错误隐藏和错误纠正算法的解码器的PSNR,和采用了本文的算法解码器的PSNR值,将二者进行对比。具体的实验结果如下表所示,从结果可以看出,采用本文的方案对于PSNR有明显的改善,大大改善了误码带来的图像质量问题。

综上所述,在目前现有的网络环境下,视频通信中数据通信想完全避免发生错误是很困难的,所以利用图像通信的特点,将错误纠正和错误隐藏技术应用到视频通信中是不可避免的,本文采用了在编码端加入视频头纠错和自适应错误隐藏技术。根据实验结果表明,系统的稳定性和鲁棒性得到很大的提高。

序列名称	正确 PSNR	错误 PSNR	采用本算法的 PSNR	序列说明	误码率
basket	25.4155	22.9421	24.889	背景静止,多个物体剧烈活动	5.1×10^{-5}
dancer	34.8155	28.2674	33.5141	背景快速运动,两个物体快速运动	5.3×10^{-5}
Flower	23.556	19.7432	23.0514	背景缓慢移动,个别小物体缓慢移动	5.3×10^{-5}
Cost-guard	27.30155	24.0734	26.8305	背景缓慢移动,单个大物体缓慢移动	5.3×10^{-5}

(下转第204页)

故得到对第 $n+1$ 点的预测为: $y_{n+1} = \sum_{i=1}^{n-p} ((\alpha_i - \alpha_i^*)k(\vec{x}_i \cdot \vec{x}_{n-p+1})) + b$, 得到第 $n+1$ 点后, 又可以得到一个样本数据 $X_{n-p+2} = (x_{n-p+2}, x_{n-p+3}, x_{n-p+4}, \dots, x_n)$, 其中 x_{n+1} 表示第 $n+1$ 个数据的预测值, 可得第 $n+2$ 点的预测值 y_{n+2} 。一般得到第 l 步的支持向量机预测模型为:

$$y_{n+l} = \sum_{i=1}^{n-p} ((\alpha_i - \alpha_i^*)k(\vec{x}_i \cdot \vec{x}_{n-p+l})) + b, \text{ 其中 } X_{n-p+1} = (x_{n-p+1}, \dots, x_n)。$$

3.3 性能评价

在实际应用中常常通过统计量来逼近模型以评价模型的性能。定义均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)如下,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_p - m_{l=n+1}} \sum_{i=1}^{n_p} (x_i - y_i)^2}, \text{ 其中 } y_i \text{ 是 } x_i \text{ 的逼近值。}$$

为评价模型的预测效果, 取均方根相对误差(Root Mean Square Relative Error, RMSRE)为:

$$RMSE_l = \sqrt{\frac{1}{N - n_{p,l} - n_p} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - y_{l,i}}{x_i} \right)^2}, \text{ 其中 } y_{l,i} \text{ 是 } x_i \text{ 的 } l \text{ 步预测值。}$$

在该预测模型中, 利用小波理论的多分辨率分解, 引入基于小波框架的核函数, 分离非平稳时间序列的趋势项、周期项和随机项, 并对不同尺度成分进行分析预测, 最后再重构得到原时间序列的预测值, 进一步提高了预测效率和预测精度。

4 WSVMF在电子商务交易模型中的应用

电子商务交易模型是在一定限制策略下的交易方式, 它在某种程度上满足了交易各方的利益需求, 同时也通过某些规则规范了参与交易的各方的交易行为, 从而保证了交易效率和交易的有效性、公平性。以多智能主体为基础的电子商务交易模型, 在实际系统中, 智能主体集群所构成的交易环境的状态往往是连续的, 状态空间巨大, 数组无法表示这些状态, 于是采用函数映射的方法就自然成为解决问题的出发点, 而基于小波的支持向量机预测模型(WSVMF)可以通过小波框架的构造来逼近和预测各交易主体的未来行为, 从而解决电子商务交易中交易状态预测困难的问题。

这里取 5 个交易主体对 6 种商品在 58 次竞标中的数据为基础, 以预测各交易主体在未来行动中的出价策略。将数据分成两组, 前 30 组数据作为训练数据, 后 28 组数据为测试

数据, 采用递归神经网络(RNN)预测模型与基于小波的支持向量机预测模型分别进行前 5 步预测, 实验结果如表 1 所示。

表 1 预测步数与均方根相对误差

Forecasting step	WSVM	RNN
1	0.0015	0.0025
2	0.0026	0.0387
3	0.0562	0.0869
4	0.1188	0.1321
5	0.1297	0.2572
6	0.2011	0.3829

实验结果表明, 在短期预测中具有非常理想的效果, 在较长区间的预测中仍然具有较高的预测精度(6 步预测仍可保证 84.63% 的准确度)。

小结 本文构造了基于小波的支持向量机模型(WSVMF), 并建立了基于时间序列 WSVMF 预测模型(WSVMF)。该模型引入了损失函数和基于小波框架的核函数, 将数据 $\vec{x}$ 映射到高维特征空间 F 进行线性回归预测, 提高了预测的精度和预测效率。将该预测模型应用于基于多智能代理的电子商务交易模型中可较好地解决交易状态表示及预测等问题。

参考文献

- 冯象初, 等. 数值泛函与小波理论[M]. 西安电子科技大学出版社, 2003
- Donoho D L, Johnstone I M. Minimax Estimation via Wavelet Shrinkage [R]: [Technical Report]. Department of Statistics, Stanford University, 1992
- Chang Mingwei, Lin Chenjen; Weng RC. Analysis of non-stationary time series using support vector machines [A]. SVM 2002, Niagara Falls[C], Canada, 2002. 160~170
- Besag J. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems(with discussion). J Royal Statist Soc, Series B [J], 1972, 36: 192~326
- van Raalte C, Webers H. Spatial competition with intermediated matching. Journal of Economic Behavior & Organization, 1998, 34: 477~488
- 唐亮贵, 程代杰. 基于 Multi-Agent 的撮合交易系统体系结构. 计算机工程, 2003, 29(15): 166~168
- Sofia T, Ioannis P. MPEG2 error concealment based on block-matching principles. IEEE Transactions on Circuit and system for video Technology, 2000, 10(4): 1~11
- Park J W, Kim J W, Lee S. DCT coefficients recovery based on error concealment technique and it application to the MPEG2 bit stream error. IEEE Transactions on Circuit and System for Video Technology, 1997(7): 845~854
- Cao J H, Li F T. DCT coefficients recovery of erroneous image for MPEG2. IEEE ICNNSP, 2003
- 冯亚林, 余松煜, 庄健敏. MPEG2 视频通信中的自适应错误隐藏算法. 上海交通大学学报, 1999(4)

(上接第 86 页)

参考文献

- ISO/IEC 13818-2. Generic coding of moving picture and associated audio. International Organization for Standardization, International Standard, 1995
- Wang Yao, Zhu Qinfan. Error Control and Concealment for video communication; A Review. Proc IEEE, 1998, 86(5): 974~997
- Aign S, Fazel K. Temporal and spatial error concealment techniques for hierarchical MPEG2 video codec. In: IEEE Intl. Conf. on Communication, Washington, 1995