

基于数字水印的错误检测和定位技术

陈名华, 何芸

微波与数字通信国家重点实验室

清华大学 电子工程系, 北京 100084

文 摘 在有误码的环境中进行视频通信, 很多时候要求解码器具备错误检测定位和错误隐藏的能力。基于语法(Syntax)检测的传统检测方案低的检测率和定位率将极大地影响错误隐藏的效果。本文提出了一种基于数字水印的错误检测和定位技术, 通过在视频数据中嵌入易碎的数字水印(Fragile Watermark)来提高检测和定位错误的能力。实验结果表明, 相比于传统方案, 采用该技术可以大幅度提高错误的检测率和正确定位率, 同时图象的客观质量只有微弱的降低。

关键词 数字水印; 错误检测; 错误定位

中图分类号 TN919.81

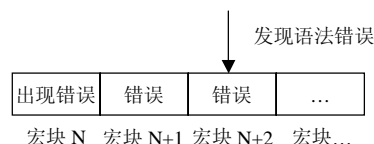
引言

在视频通信系统中, 在很多情况下信道存在误码, 而由于采用了可变长编码(Vary Length Coding, VLC)技术和运动补偿(Motion Compensation, MC)技术, 高压缩的视频码流(如 H.263 码流)对信道错误非常敏感。为了解决这一矛盾, 通常采用纠错编码^[1]和交织编码^[1]技术来提高视频码流的抗误码性; 为了减小无法纠正的误码对接收端重建图象质量的影响, 往往在视频解码器端采用错误检测定位^[1](Error Detection)和错误隐藏技术^[1](Error Concealment)。重建图象中的错误宏块被检测和定位后, 进行错误隐藏。因此, 错误宏块能否被检测和正确定位, 对错误隐藏的效果有重要的影响。由于错误隐藏技术一般都是以宏块为单位进行处理的, 因此, 以下若非特别说明, 错误的检测和定位都指的是以宏块为单位的错误检测和定位。¹

传统的基于语法的错误检测和定位方案包括以下检测手段: 1) 解码后的运动矢量大小是否超出规定范围; 2) 解码后的 VLC 码字是否合法; 3) 解码后的 DCT 系数数值是否超出规定范围; 4) 解码后, 一个 8×8 DCT 块中 DCT 系数的个数是否

超过 64 个; 5) 解码后得到的量化参数是否超出规定范围。该方案尽管由于简单易行而得到广泛的应用, 但在检测 DCT 系数错误上仍存在大的缺陷: i) 错误检测率比较低, 一般为 25~50%; ii) 错误的正确定位率很低, 一般只有 5~20%, 误码导致的连续多个宏块的错误往往无法在刚刚出现错误宏块的时候就被发现, 而是要“滞后”几个宏块才会因出现语法上的错误而被检测出来(见图一)。由于错误隐藏技术无法应用于这些未被定位的错误宏块, 因此这些宏块的错误会对图象质量有明显的负面影响; 再考虑到运动补偿技术的采用, 这些错误会漂移积累下去, 直到图象被正确的 Intra 宏块刷新为止。

本文在研究了数字水印技术的基础上, 将数字水印技术应用到错误检测中, 提出了一种基于数字水印的错误检测和定位方案。该方案通过将数字水印嵌入到 Q-DCT 系数中并通过检测水印的完整性来达到检测错误宏块的目的。实验结果表明, 在同等应用环境下, 相比仅基于语法检测的传统方案, 错误检测率和错误正确定位率均有大的提高。



图一: 错误宏块定位“滞后”示意图

本文将在第一部分简要地介绍一下数字水印技术; 在第二部分阐述数字水印错误检测方案的内容; 第三部分则给出了实验结果; 第四部分为结论。

1. 数字水印技术

数字水印技术(Digital Watermark)是在近七年发展起来。顾名思义, 它是指采用数字处理的方法, 在数字格式的数据(如二进制的图象文件)中加入一些特定的信息, 以起到某些特定的作用, 如防伪验证。由于和现在采用的模拟水印(如人民币中的水印图象)的技术目的类似, 所以被称为数字水印

收稿日期:

基金项目: 自然科学基金(69972021), 清华大学 985 基金
第一作者: 男, 1977 年生, 硕士研究生

技术。

当前,数字水印在数字图象和 MPEG-2 视频中的应用比较多,主要都是以防伪验证为目标,也有以检测攻击和协助数据恢复为目标。按照应用目的来分,数字水印一般可以分为两类: i) 鲁棒的数字水印(Robust Digital Watermark)。这类数字水印以防伪验证为主要应用目标。它期望不论经过什么样的攻击,数字水印都能够被保存在数据当中,而不会在攻击后被抹去。这样就确保了总是可以根据数据中能否检测到特定的数字水印来鉴别数据的真伪性。 ii) 易碎的数字水印(Fragile Digital Watermark)。这类数字水印以检测是否存在攻击以及确定攻击的位置为主要目标。它期望如果存在对数据的篡改或攻击,则通过检测数字水印应该判断是否发生了攻击或篡改,而且最好能够指出数据被攻击的部位。这样就可以根据检测数据中的数字水印来验证数据的完整性。

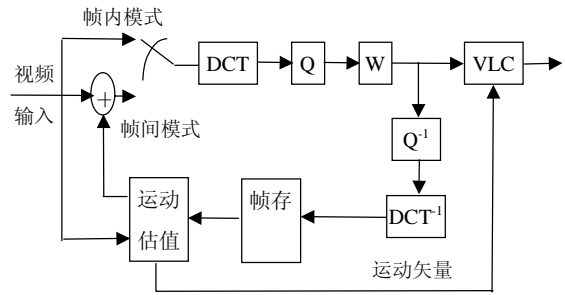
目前一般采用加入伪随机噪声(Pseudo Noise)或强制关系(Force Correlation)的方法来实现水印数据的嵌入。但是不论是那种应用,都要求加入的水印应具有不可感知性。不可感知性是指图象质量不应该因水印的加入有明显的改变,否则将影响图象的商业价值。数字水印技术正在发展当中,尚未有相关的标准被制定出来。在本文中,易碎的数字水印技术被应用到错误检测中,取得了很好的效果。

2. 数字水印误码检测方案

该方案主要是针对传统的 MC+DCT+VLC 编码方案进行设计的,因此可以应用于目前绝大多数视频编解码标准。该方案的描述如下:

1. 在视频编码端,在量化后的 8×8 块的 DCT 系数(简称 Q-DCT 系数)中嵌入特定的数字水印;之后这些 Q-DCT 系数继续进行 MC 和 VLC。
2. 在视频解码端,在解出一个 8×8 块的 Q-DCT 系数之后,检测其中数字水印的完整性。如果数字水印被破坏,则认为当前 8×8 块被信道误码损坏,反之则认为当前 8×8 块是正确的。当一个宏块内的所有 8×8 块都是正确的时候,我们就认为该宏块是正确的;而只要有一个 8×8 块被损坏,就认为该宏块是错误的。

同时为了避免由于水印的嵌入而引起的误差漂移和积累,数字水印的嵌入模块被集成到 MC 的环路中。结合了数字水印嵌入模块的 MC+DCT+VLC 编码框图如图二所示,其中 W 模块即为数字水印嵌入模块。



图二：结合水印嵌入的 MC+DCT+VLC 编码方案

从图二可以看出,在 Q-DCT 系数中人为地嵌入了数字水印,必将会造成编码增益的下降。实际上,在数字水印错误检测方案中,错误检测率和正确定位率的提升是以编码增益的损失为代价的,这两者之间存在一个折衷(Tradeoff)关系;根据所采用的数字水印的不同,还会导致码流码率的变化。

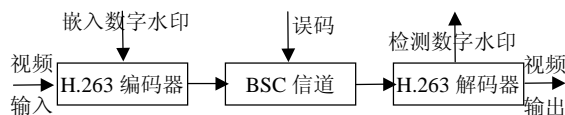
优化该方案的过程就是通过选取一个合适的数字水印,获得高的错误检测率和正确定位率,同时具有小的编码增益损失,不增加或少增加码流的码率。如果代价太大,方案就失去可行性和意义。

在论文工作进行的同时,Wang^[2]提出了一种利用数据隐藏(Data Hiding)技术协助进行错误检测的方案。尽管具体实现有所不同,这两种方案在本质上都是想通过和图象数据有关联的信息来进行错误检测。相比传统的基于语法的方案,Wang 的方案将错误正确定位率提高了 10%~30%,然而其缺点在于复杂度较高、没有明确的优化目标以及没有给出具体详细的和传统方案的比较结果。

3. 实验结果及讨论

3.1 实验环境

本文实验利用 TMN8^[3]所提供的软件作为编解码的平台,并加入了基于语法的错误检测模块、数字水印嵌入模块和检测模块。所有的结果都是在只有数字水印加载模块和数字水印检测模块不同的条件下进行的。本实验对多个图象序列进行了测



图三：实验所用视频通信系统仿真框架图

准测试序列——Akiyo、Mother and Daughter 和 Car Phone 来进行分析比较。这三个视频序列分别代表了不同复杂度的视频。其中 Akiyo 最为简单,而 Car Phone 最为复杂。实验中选取了每个序列的 240 帧逐行的 CIF(352×288 像素, YUV 4:2:0)序列作为视频源,编码帧率为 30 帧/秒。

整个通信系统的框图如图三所示。其中，本文选择随机误码率为 5×10^{-4} 的 BSC(二元对称信道, Binary Symmetric Channel)作为实验信道，是基于一个假设，即编码所得码流在纠错编码和交织编码的保护下通过任何一个实际信道，只要纠错编码能力足够好而且有足够的交织，就可以等效为该码流直接通过一个 BSC 信道。经验表明，在比较恶劣的信道环境中，即使采用保护能力比较强的纠错码和交织码，等效之后得到的 BSC 信道的随机误码率仍可能达到 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 。这也从另一个方面说明了解码器具备错误检测定位能力和错误隐藏能力的必要性。在本文实验中，为了重点考察对错误的 Q-DCT 系数的检测定位能力，实现中强制约束了误码仅导致 Q-DCT 系数的错误。

本实验中选用的比较方案是基于语法的错误检测和定位方法，该方案在目前得到非常广泛的使用；本实验中的待评估方案在其基础上结合了数字水印错误检测和定位方案。本文将从错误检测率、正确定位率和图象质量三个方面进行测试和评估。为了去掉各种码率控制策略所引起的不同，本实验采用了固定量化步长的方案。图象质量是用平均峰值信噪比(\overline{PSNR})来衡量的(单位是 dB)，由于在嵌入数字水印前后码流的码率会发生变化，因此直接比较不同方案的 \overline{PSNR} 是没有意义的，本文先根据率失真(R-D)曲线得到不嵌入数字水印时，对应嵌入后的码率下的 \overline{PSNR} ，然后再和嵌入数字水印后的 \overline{PSNR} 进行比较，这就是实验结果中 $\Delta \overline{PSNR}$ 的计算方法。

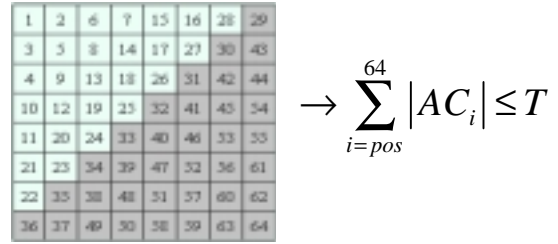
3.2 所采用的数字水印

在本实验中，我们采用了类似于文献[4]中的强制关系数字水印。该数字水印除了具备一般易碎的数字水印的特点以外，还有一个最大优点就是不增加或者少增加码流的码率，这对视频通信来说是很有意义的。由于该水印对 Q-DCT 系数进行了截取，一般来说，码流码率会有所下降；但是由于这种截取带来了失真，会造成帧间残差的增大；因此当由截取引起的码率下降小于由传输增大的残差而引起的码率上升时，反而会导致码流码率的增大。这在本实验的结果里也有表现。

该数字水印方案的描述如下，对每一个 8×8 块的 64 个 Q-DCT 系数，保持其从选定的系数 AC_{pos} 开始一直到 AC_{64} 的绝对值之和小于某一个阈值 T (如图四所示)。在编码端对每一个参与编码的 8×8 块 Q-DCT 系数强制该关系；在解码端对该强制关系进行检测，强制关系保持不变的情况被认为是当前 8×8 块没有错误发生，而强制关系被破坏

则说明当前 8×8 块一定发生了错误。

截取位置 pos 的值可以随着 I、P 帧的不同、色度和亮度块的不同以及编码所采用量化参数的不同而不同。阈值 T 则控制了由于嵌入数字水印而导致的图象的失真大小。在量化参数一定的情况



图四：实验所用数字水印示意图

下，在一定的变化范围之内，阈值 T 越大，码流码率越大，图象的失真越小，但是错误检测率会有所下降；反之亦然。本文实验采用的量化参数(Q_p)为 10； pos 的取值 I 帧为 44，P 帧为 29；阈值 T 选取 0 和 2。

3.3 实验结果

本文实验结果从错误检测率、正确定位率和 \overline{PSNR} 三个方面对基于语法检测的传统方案和本文的数字水印方案进行了比较。从三个序列的实验结果可以看出，相比传统方案，本文方案在 $T=0$ 的时候，错误检测率提高了 43%~110%，对错误隐藏效果有决定性影响的正确定位率提高了 300%~610%， \overline{PSNR} 下降了 0.3~0.65dB (尽管此时 Car phone 序列的 \overline{PSNR} 下降了 0.65dB，但是观察发现其主观图象质量并没有出现可以察觉的损失)；而在 $T=2$ 时错误检测率提高了 20%~60%，正确定位率提高了 130%~170%，但此时 \overline{PSNR} 几乎没有什么损失。采用本文方案后，码流的码率基本上都下降了；只有 Mather and Daughter 序列在本文方案取 $T=2$ 时码流码率增加了 0.1%(0.21Kbps)，而从 3.2 节的分析得知这也是合理的。容易看出对于本文实验所用的数字水印方案，阈值 T 越大， $\Delta \overline{PSNR}$ 越小，即通过改变阈值 T 可以影响客观图象质量的损失；然而这样一来，错误检测率和正确定位率却下降了。因此，实验结果表明，对于本文所采用的数字水印方案，在图象质量和错误检测定位率之间确实存在着一个折衷(Tradeoff)关系。

由于如果一个宏块条带(Slice)中有一个宏块发生了错误，其后的宏块也只能被当成错误宏块进行错误隐藏处理，因此单纯计算宏块的检测率是没有太大意义的。实验结果中的错误检测率为方案检测到的错误宏块条带数和总错误宏块条带数的比值，正确定位率为被方案及时检测到，未发生本文

引言中提及的宏块“滞后”现象的错误宏块条带数和总错误宏块条带数的比值。

表一 Akiyo

错误检测和定位	码流码率	错误检测	正确定位	\overline{PSNR}	$\Delta \overline{PSNR}$
方案	(Kbits/s)	率(%)	率(%)	(dB)	(dB)
基于语法	92.56	28.9	11.3	36.45	--
实验方案($T=0$)	87.97	60.7	45.4	35.82	0.36
实验方案($T=2$)	91.88	45.9	26.7	36.43	0.02

表二 Mother and Daughter

错误检测和定位	码流码率	错误检测	正确定位	\overline{PSNR}	$\Delta \overline{PSNR}$
方案	(Kbits/s)	率(%)	率(%)	(dB)	(dB)
基于语法	158.14	31.1	6.0	34.95	--
实验方案($T=0$)	155.60	54.8	28.1	34.62	0.30
实验方案($T=2$)	158.35	37.9	16.6	34.95	0.00

表三 Car Phone

错误检测和定位	码流码率	错误检测	正确定位	\overline{PSNR}	$\Delta \overline{PSNR}$
方案	(Kbits/s)	率(%)	率(%)	(dB)	(dB)
基于语法	333.76	37.0	4.9	35.36	--
实验方案($T=0$)	291.59	53.2	35.7	34.08	0.65
实验方案($T=2$)	331.29	44.3	18.4	35.18	0.12

4. 结论

本文提出了一种基于数字水印的错误检测和定位技术。该技术通过在编码时于 Q-DCT 系数上嵌入易碎的数字水印(Fragile Digital Watermark), 并且在解码端检测该数字水印的完整性, 来提高图像中错误宏块的检测率和正确定位率, 以使错误隐藏技术能有更好的效果。实验表明, 通过选取适当的数字水印, 在量化参数为 10, 误码率为 5×10^{-4} 的情况下, 相比基于语法检测的传统方案, 在不增加或少增加码流码率的前提下, 可以将错误检测率提高 40%~110%, 将正确定位率提高 300%~620%; 而 \overline{PSNR} 只有微弱的下降, 方案的复杂度也很低。

5. 致谢

作者诚挚地感谢 Reginald L. Lagendijk 教授在研究中给予的帮助和支持; 同时还要感谢兰军强和谢乐星同学给予的在编程上的帮助。

6. 参考文献

[1]. Yao Wang, Qin-fang Zhu, Error Control and Concealment for Video Communication: A Review, Proceeding of The IEEE, Vol 86, No. 5, May 1998,

974-997

[2]. Teng Sing Wang, Pao-Chi Chang, Chih-Wei Tang, Hsueh-Ming Hang and Tihao Chiang, "An Error Detection Scheme using Data Embedding for H.263 Compatible Video Coding", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG99/N6340 July 2000

[3]. ITU-T Study Group 16. TMN8 video codec test model near-term version 8[R]. Q15-B-46. Sunriver; ITU-T, 1997,09

[4]. G.C. Langelaar, R.L. Lagendijk, J. Biemond, "Real-time Labeling Methods for MPEG Compressed Video", 18th Symposium on Information Theory in the Benelux, Veldhoven, The Netherlands, May 15-16, 1997

A watermarking-based error detection scheme for hybrid video decoder

Minghua Chen, Yun He

State Key Lab. of Microwave and Digital Communications
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University,
Beijing, 100084, People's Republic of China

Abstract In video transmission over not-perfect channels, compressed video streams are highly sensitive to packet loss and bit errors. Many error concealment techniques have been applied to video decoding. Yet, the effectiveness of error concealment schemes often relies on how many and how correctly the errors can be detected. An embedded watermarking error detection scheme for decoder was proposed in this paper, where the particular fragile watermark is embedded into the quantized DCT coefficients at the encoder, thus the decoder can easily extract the watermark for detecting errors and their accurate occurrence locations at the macro-block-layer. The simulation results show that at the bit error rate 5×10^{-4} , comparing to the widely used syntax based error detection technique, the proposed scheme is able to increase the error detection rate with an extra 40%~110%, increase the error correct location rate with an extra 300%~620%, depend on the watermarking techniques used, while the \overline{PSNR} decrease and complexity are low.

Key words fragile watermark; watermarking; error detection; error resilience