

密级：公开

# 基于易碎的数字水印的错误检测 理论和技术

Fragile Digital Watermark Based Error  
Detection Theory and Technique  
(申请清华大学 工学 硕士学位论文)

院（系、所）：清华大学电子工程系

专    业：通信与信息系统

研    究    生：陈名华

指    导    教    师：何芸

2001 年 5 月

# 独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得清华大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名：\_\_\_\_\_日 期：\_\_\_\_\_

# 关于论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

**(保密的论文在解密后应遵守此规定)**

签 名：\_\_\_\_\_导师签名：\_\_\_\_\_日 期：\_\_\_\_\_

目录

摘要 .....	4
Abstract .....	5
第一章 绪论 .....	6
1.1 选题背景 .....	6
1.2 论文工作 .....	7
1.3 论文章节安排 .....	8
第二章 问题的提出和分析 .....	9
2.1 在有误信道上进行视频传输存在的问题 .....	9
2.2 常用的整体解决方案 .....	9
2.3 基于语法检测的错误检测方案及其存在的问题 .....	11
2.4 本章小结 .....	15
第三章 数字水印误码检测技术 .....	16
3.1 引言 .....	16
3.2 一般性框架 .....	17
3.3 数字水印方案 FEW(Force Even Watermarking) .....	19
3.4 本章小结 .....	20
第四章 对 FEW 的理论分析 .....	22
4.1 错误检测率的分析 .....	23
4.2 由于水印嵌入而导致的图象质量下降的分析 .....	25
4.3 实验验证和一个重要的折衷(Trade-off) .....	28
4.4 本章小节 .....	30
第五章 实验结果 .....	31
5.1 实验目的 .....	31
5.2 实验环境 .....	32
5.3 实验结果 .....	34
5.4 本章小结 .....	40
第六章 总结 .....	42
参考文献 .....	45
致谢 .....	48
附录 .....	49
附录 A .....	49
个人简历 .....	50

## 摘要

在带宽受限的有误信道（如无线信道）上进行视频传输面临着一些很有挑战性的问题，其中很重要的一个矛盾是：一方面，为了提高带宽利用效率而进行压缩得到的码流对信道比特误码非常地敏感，而另一方面有误信道由于反射和衰落引入了大量的随机误码和突发误码，影响了正确的视频通信传输。解决该问题需要一个整体的解决方案，在目前的信源信道编码分离的常用整体解决方案中，通常在视频解码端采用错误隐藏技术来改善错误发生时重建图象的质量。但是，错误检测的结果对错误隐藏技术的效果和效率有着决定性的影响。传统的基于语法检测的错误检测方案尽管简单易行，但是在检测量化后的 DCT(Q-DCT)系数的错误上存在着重大缺陷，而在视频传输中 Q-DCT 系数信息出错的概率又比较大。导致未被检测到的错误的宏块无法应用错误隐藏技术，结果重建图象的质量很差，再加上运动补偿技术的采用，帧内的错误将扩散到多帧重建图象中去，整个重建序列的质量将令人无法接受。

本文提出了一种基于易碎的数字水印的错误检测技术。通过在编码时于 Q-DCT 系数上嵌入易碎的数字水印(Fragile Watermark)，然后在解码端检测水印的完整性，解码器可以判断出当前宏块是否已经被信道误码所损坏，从而对其启用错误隐藏例程。本文给出了一般性方案框架和一个具体的 FEW 方案，同时给出了对 FEW 方案的错误检测能力和造成的图象质量的下降进行了理论分析。利用得到的函数关系式，我们可以评价水印方案的性能表现；也可以根据所要求的性能来设计数字水印方案的参数。仿真实验的结果显示，相比于传统的基于语法检测的方案，本文方案在错误检测能力上有本质的提升，而同时方案带来的 PSNR 下降和计算复杂度等代价都很小。

在本文中，我们还指出在错误检测能力和图象质量下降之间存在着一个重要的折衷关系，同时，我们还在 FEW 方案中对折衷关系在理论上和实践上进行了验证。

关键字：数字水印，易碎的数字水印，数字水印的优化，错误检测，误码抵抗和容错

## Abstract

Video transmission over band-limit error introducing channels provides several challenging problems that remain to resolve. An important one is on one hand compressed video streams are highly sensitive to bit errors, on the other hand, however, the channels introduce vast random bit error and burst errors, impeding the correct video communications. Despite of many error resilience techniques are applied, there are still undetected transmission errors existed in the streams that passed to video decoders. So, it is often required for video decoders to detect and conceal erroneous visual contents caused by those undetected transmission errors. Some efficient 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. Traditional widely used syntax based error detection scheme performance poorly, leading to unsatisfied reconstructed images even after concealing those detected erroneous visual contents. An embedded watermarking transmission error detection technique for decoder is proposed in this paper, where the particular fragile watermark is embedded onto the quantized DCT coefficients at encoder, thus decoder can easily extract the watermark for detecting errors and their accurate occurrence locations at macro-block level. Analysis for watermark optimization is also provided in this paper, with de expressions derived, the performance of the watermarking scheme can be measured. More, the parameter of the watermarking scheme can be analytically derived if the performance requirements are pre-defined. The simulation results show that, comparing to the widely used syntax based error detection scheme, the proposed scheme can largely improve the error detection capabilities of video decoder, while the *PSNR* loss and cost are low. Further more, an important trade-off between error detection capabilities and visual quality loss due to watermark embedded is stated, analytically and experimentally crosschecked.

**Key words** fragile watermark; watermarking; optimized watermarking, error detection; error resilience

## 第一章 绪论

### 1.1 选题背景

从二十世纪八十年代后期开始, 视频业务开始在数字通信和数字广播中得到广泛的应用, 在二十世纪九十年代得到了快速的发展。在实际的信道上进行视频数据的传输引入了很多需要解决的问题。其中有两个重要的问题一直得到学术界和工业界的重视, 一是视频数据量非常巨大而且冗余度比较高, 一般不能或不合适直接在信道上进行传输, 因此必须采用有效的视频压缩手段将信源数据进行压缩; 二是压缩后的码流对信道误码非常敏感, 如果没有适当的保护手段, 不能进行正常的传输, 因此必须采用有效的抗误码措施。

针对第一个问题, 几十年来学术界和工业界做了大量的工作, 这些工作的成果最后促成了国际标准化组织的若干有效的图象压缩标准。H.261[1]是 CCITT (现在的 ITU-T) 组织提出的第一个高效视频编码标准, 其技术于 1988 年冻结, 它的目标是在  $P \times 64\text{kbps}$  ( $p=1, 2, \dots, 30$ ) 码率下进行视频编码。H.261 主要应用于会议电视。MPEG-1[2][3]于 1988 年由 MPEG 组织提出, 1991 年正式成为国际标准草案。它既可以应用于 Video CD 光盘的节目存储 (其目标码率为 1.5Mbps), 也可以应用于 2Mbps 及以下数据率的视频传输。MPEG-2[4][5]在 1990 年由 MPEG 组织提出, 1994 年技术冻结, 它适于 1.5M-20Mbps 的信道。H.263 以及 H.263+[6]是 ITU-T 组织提出的低码率视频编码标准, 主要应用于可视电话等低速率多媒体通信系统。这些传统的视频编码技术可以对视频序列进行压缩比超过 1:100 的压缩。为了追求效率更高的压缩效果, 在 1995 年, MPEG 组织又在 MPEG-4[7][8]中引入了视频目标、形状编码等概念, 通过概念的转换和新技术的采用, 期望可以将编码效率在现有的基础上进一步提高, 同时提供视频码流的功能性。

第二个问题在近几年无线视频应用的需求迅猛高涨起来后显得越来越突出。在以前的应用中, 对数据的保护往往由信道编码来完成, 如采用前向纠错码 (Forward Error Correction, FEC)对码流进行保护。最近, 包括 MPEG-4 在内的国际标准开始考虑在信源编码时考虑码流的抗误码性(Error Resilience), 引入了如

数据分集(Data Partitioning)和前后向可解码的可变长编码 (Reverse Variable Length Coding, RVLC)这样的技术。这样做的好处在于可以减小信道编码的误码抵抗和检测的负担,从而使得信道的利用效率得到提高。由于无线信道引入了大量的随机误码和突发误码,因此对视频码流的保护和对错误的检测成为一个非常突出的问题。

综上,对于上文提到的两个问题,第一个问题一直是前一段时间学术界和工业界研究的重点,到目前为止得到了可以投入实用的解决方案。而对于第二个问题,以前对误码的抵抗和检测一般是由信道编码来完成的,现在随着无线视频应用的兴起,在信源编码器中,从视频码流结构上研究其抗误码性能,成为近两年来研究的一个热点。例如在编码器中根据数据的重要性不同而施以不同的信道编码方法[9][10],此种技术属于信道编码方法在信源编码器中的运用;又如多描述信源编码方法,利用多通道阻断码流结构内部的关联,同时有利于错误隐藏[11][12];以及 MPEG-4 协议中采用的数据分集技术等等。本文提出了利用水印技术来增强视频码流误码识别性能的理论和技术。

## 1.2 论文工作

本文分析了在带宽有限的有误信道上进行视频传输存在的问题,讨论已经有的解决方案和仍然存在的不足之处,指出由于目前采用的基于语法检测(Syntax Check)的错误检测方案的效果很差,影响了解码端进行错误隐藏(Error Concealment)的效率和效果。在此基础上,注意到数字水印技术(Digital Watermark)在防数据篡改上的新应用,本文创造性地将易碎的数字水印引入到视频通信的误码检测应用中来,提出了基于数字水印检测的错误检测方案。实验结果显示,本文提出的方案相比于传统的基于语法检测的方案,错误检测效果得到非常大的提升,同时方案还具有复杂度低和兼容性好的优点。

本文认为,在数字水印错误检测技术中,在错误检测率和由于水印的嵌入而导致的图象质量下降之间,存在一个折衷(Trad-off),这一点得到理论分析和实验的验证。在基于一些假设的基础上,本文通过推导分别得到了数字水印参数、系统参数和错误检测率、图象质量下降之间的函数关系。这两个函数关系对根据实际的要求来设计数字水印的参数,或者是根据数字水印的参数来估计实际

效果有重要的意义。

## 论文章节安排

本文分成六个部分进行。第一章是绪论，介绍了课题的背景、论文工作和论文的章节安排；第二章对目前在有误信道上进行视频传输存在的问题进行了分析，并指出论文的工作重点；第三章提出了数字水印检测技术的思想和一般性框架，给出了优化的目标，并且给出了一个具体的数字水印方案 FEW；第四章对 FEW 方案的错误检测能力和带来的图象质量损失进行了理论分析，并对图象质量损失的分析结果给出了实验的验证；第五章是仿真实验部分，对本文方案和传统方案进行了评估对比，同时还显示了不同参数对方案性能的影响；第六章是对论文工作的一个总结。

## 第二章 问题的提出和分析

### 2.1 在有误信道上进行视频传输存在的问题

近年来，在带宽受限的有损信道上（如无线信道）进行视频传输成为一个应用的热点。由于带宽有限，所以必须首先对视频数据进行高效率的压缩，通常情况下，我们采用 H.26x 或 MPEG-x 来完成压缩的工作。这些国际标准通过离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)来压缩帧内数据的相关性，利用预测编码技术，如运动补偿，来减小帧间数据的相关性，此外，还采用了变长编码技术(Variable Length Coding, VLC)来减小符号之间的相关性。实践证明，这些国际标准能够达到比较高的压缩效率。

但是，压缩后的码流在无线信道上的传输仍然存在着一些棘手的问题，其中很突出的一点是：一方面，这些压缩后的码流对信道比特误码非常地敏感，而另一方面无线信道由于多径反射和衰落引入了大量的随机误码和突发误码[13]，影响了码流的正常传输。尤其是当采用了 VLC 方案后，码流更加容易受到误码的影响，结果在解码端将失去与编码端的同步，导致在遇到下一个同步码字之前无法对 VLC 码字进行正确的解码；同时预测编码技术会将错误扩散到整个视频序列中，极大地降低重建图象的质量到一个令人无法接受的水平。因此，如果不采用一些抗误码措施(Error Resilience)，整个视频通信系统是无法正常运作的。

而在加入了一些误码抵抗措施之后，往往会导致码流的冗余度上升，这意味着信道带宽的利用效率降低了，进而要求对视频数据进行更有效的压缩。可以看到，充分地利用带宽资源来进行视频通信和对信道误码的抵抗之间是一对矛盾。本文认为，这也是无线视频通信面临的主要矛盾。

### 2.2 常用的整体解决方案

为了使视频压缩码流能够对信道误码有更强的抵抗能力，人们采取了很多的方案和技术。如：

- ◇ 纠错编码和交织编码技术[14]

- ◇ 在信道编码级别上进行错误检测和定位[14][15]
- ◇ 重新同步(Resynchronization)技术和数据分集技术(Data partitioning) [14][16][17]
- ◇ 在视频解码端进行的错误检测(Error detection)和错误隐藏(Error Concealment)[18]

在信道编码级别上,往往采用 FEC 技术,如 RS(Reed-Solomon)编码和 BCH(Boss-Chaudhuri-Hocquenghem)编码,来进行与数据内容无关的纠错和检错。只要进行足够的交织, FEC 技术对付随机误码和突发误码还是比较有效的。然而,如 2.1 节所提到的, FEC 技术同时带来了码流长度和冗余度的增加,使得通过压缩技术提高的信道的利用效率降低了。因此,一般情况下,我们只用 FEC 技术对码流进行一定程度上的保护。重新同步方案使得解码端能够在失步后尽快地和编码端同步起来。数据分集技术则可以消除运动矢量错误和纹理数据错误之间的影响。

尽管采用了上述技术,在视频解码端接收到的码流中仍然存在未被检测到的误码,因此视频解码器必须要能够检测、处理余下的错误。通过检查码流格式和码字语法的合法性,传统的解码器可以进行错误的检测。当且仅当错误的宏块(Macro Block, MB)被检测标定后,才能在上面运用错误隐藏技术。错误隐藏技术的目的是在错误发生的时候改善重建图象的主观质量。可见,错误隐藏技术的效率和效果,是取决于错误检测模块的检测结果的。因为通常情况下错误隐藏技术是应用在宏块级别的,本文仅考虑在宏块级别的错误检测。

可见,对于误码抵抗问题的解决,一般采用的整体解决方案是在信源编码的时候加入码流抗误码性的考虑,如数据分集和设置重新同步标志(Resyn-marker)。同时对所得的码流采用信道编码进行进一步的保护。这是一种信源信道编码分开的方案(图 2-1),此外,还有人提出了信道编码辅助信源编码的思想[19](以下暂称其为辅助编码, Channel coding assisted source coding or source coding assisted channel coding),把一些信道编码的方法提前用到信源编码级别上来,特别地,在信道编码时可以利用视频编码器提供的信息也进行差别保护,如对头信息、运动信息和纹理信息采用不同长度的 FEC 编码。本文提及的整体解决方案相比辅助编码的解决方案,其优势在于码流的兼容性好,辅助编码要求信源/

信道编解码器必须要匹配，否则无法正确解码，而分立编码的方案就不需要这一点，只要是符合标准的解码器就能够对码流进行正确的解码。另外，仍然将信道编码和信源编码分离，减小了系统实现的复杂度，提高了系统的灵活性。

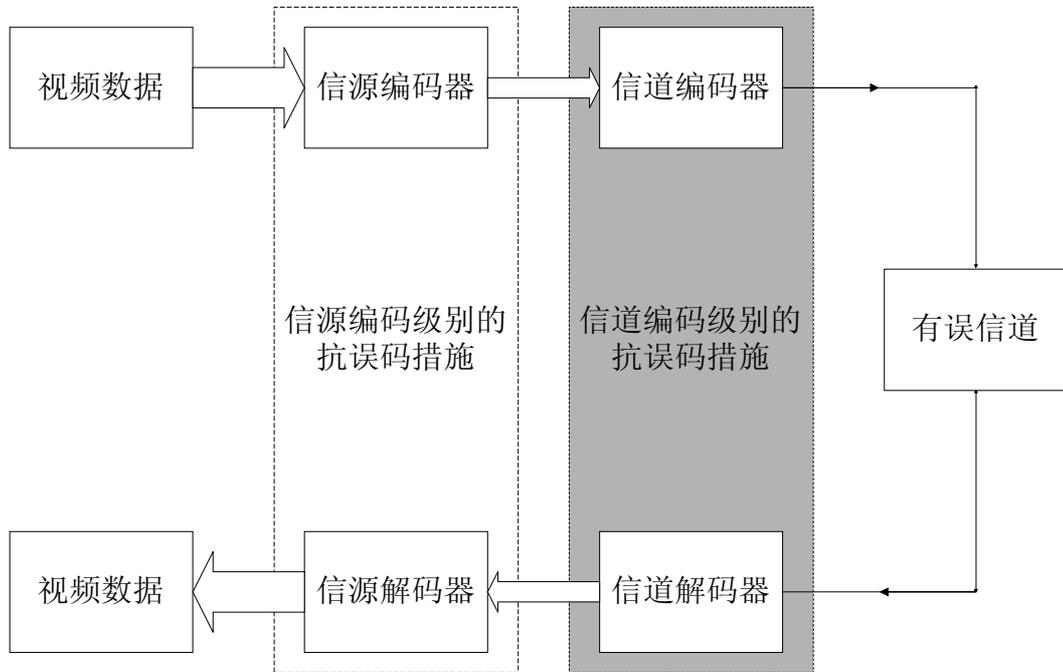


图 2-1: 信源信道编码分开的整体解决方案框架

### 2.3 基于语法检测的错误检测方案及其存在的问题

首先我们来分析一下视频码流出错时错误信息的类型。错误信息的类型有三类，一是头信息出错，二是运动矢量信息出错，三是 Q-DCT 系数信息(Quantized DCT Coefficients)出错。由于用于表示三种信息的比特数的不同，三种信息出错的概率也不完全一样。一般情况下，Q-DCT 系数出错的概率最大，而头信息出错的概率最小。由于三种信息的表示都有一些语法上的限制，因此在视频解码端可以通过语法检测(Syntax check)来检测和定位错误。在一个传统的运动补偿(Motion Compensation, MC)+DCT+VLC 的压缩系统中，以下几种基于语法的错误检测技术被广泛地应用：

- ✓ 解码后的运动矢量大小是否超出规定范围

- ✓ 解码后的 VLC 码字是否合法
- ✓ 解码后的 DCT 系数数值是否超出规定范围
- ✓ 解码后，一个 8×8 DCT 块中 DCT 系数的个数是否超过 64 个
- ✓ 解码后得到的量化参数是否超出规定范围
- ✓ 解码后的头信息是否符合语法规则的要求

该方案在检测头信息错误上有很好的效果，这是因为头信息的语法规则很严格，各信息位的取值空间很小，因此很小的错误都会导致语法规则上的不正确，从而能够被基于语法的检测方案所发现。但是该方案对运动信息错误和 Q-DCT 系数错误的检测则不能令人满意，特别是在检测 Q-DCT 系数错误上存在着很大的缺陷：

- 错误条带(Slice)检测率比较低，一般为 25~45%
- 错误的正确定位率很低，一般只有 5~15%。这里所说的错误正确定位率指的是错误发生处的宏块被检测到的概率。当一个条带内各个宏块的错误正确率都是一致的情况下，容易推导得到：  

$$\text{错误条带检测率} = 1 - (1 - \text{错误正确定位率})^{\text{条带内的宏块数目}}$$

由于错误的正确定位率很低，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 2-2）。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。

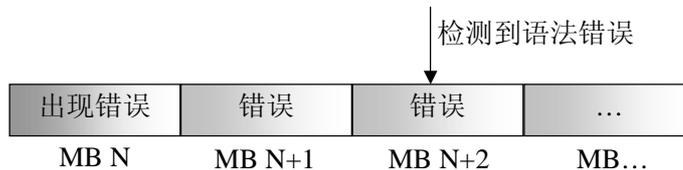


图 2-2: 错误宏块定位“滞后”示意图

此外，基于语法的错误检测方案还无法消除“移位”现象在重建图象中的出现。

所谓的“移位”现象可以参见图 2-3。当代表 Q-DCT 系数的 VLC 码字发生比特错误的时候，可能会导致 VLC 码字(Run, Length, Last)中指示当前系数是否为当前  $8 \times 8$  块中最后一位非零系数的 Last 位发生翻转，这样将会删除/增加一个  $8 \times 8$  块的边界，结果导致删除/增加了一个  $8 \times 8$  块（见图 2-3）。当 Last 值从 0 变为 1 的时候，表现为增加了一个  $8 \times 8$  块；而当 Last 值从 1 变为 0 的时候表现为删除了一个  $8 \times 8$  块。在图 2-3 所示的情况下，这样的错误并不会引起语法上的不正确，因而不能被基于语法的错误检测方案检测到，但是它会引起在一个条带内宏块的移位。如果再考虑到运动补偿技术的采用，这样的错误将会漂移下去，导致无法接受的重建图象。我们对 TMN8[20]的 VLC 码表进行了分析，有如表 2-1 所示的一些结果。根据表 2-1，我们认为，尽管并不是每次 Last 位发生翻转都会造“移位”现象（如可能会导致后继的 MCBPC 信息位出现非法码字等），但是大体上该现象出现的概率还是不小的，如果信道随机误码率为  $1 \times 10^{-3}$  的话，根据表 2-1 得到 Last 位翻转的概率大致为  $5.6 \times 10^{-5}$ ，而且这还没有把发生码字长度不同的错误时发生 Last 位翻转的概率计算在内。而从上文我们可以清楚地看到，基于语法的错误检测方案并不能防止这样现象的出现。这也是传统的错误检测方案的缺点之一。

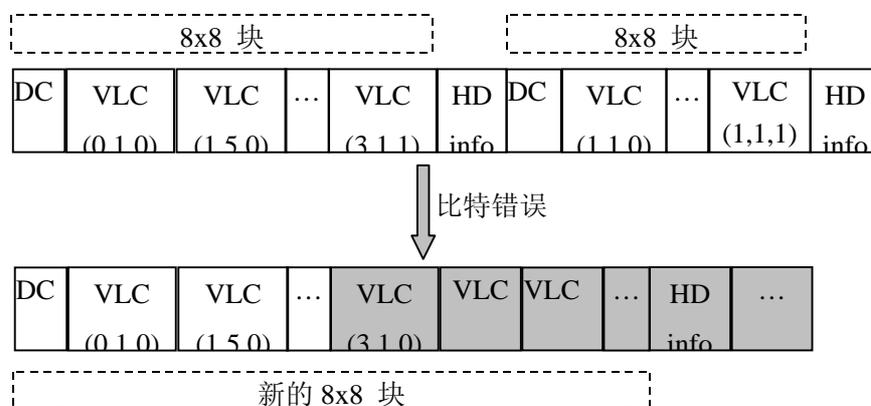


图 2-3：“移位”现象：一个  $8 \times 8$  块被删除

表 2-1：对 TMN8 码表的一些分析结果

TMN8 码表内码字总出现概率	0.990234
当一个码字内发生一个比特的误码错误时，该码字变成同样码字长度的另一个合法码字的概率	0.202932

该合法码字相比于原码字，发生 Last 位翻转的概率	0.056102
----------------------------	----------

为了进一步说明基于语法的错误检测方案的不足。我们做了一个仿真实验，我们在 TMN8 解码器的基础上嵌入了基于语法的错误检测方案。实验中，我们把用 TMN8 编码器编好的 240 帧 CIF 格式的 Car Phone 序列通过一个二元对称信道 (Binary Symmetric Channel, BSC)，编码器的量化参数 QP 取恒定值 10、编码帧率为 30 帧/秒、编码所得码流的码率为 333.76kbps，信道的随机误码率为  $5 \times 10^{-4}$ ，该随机误码我们限制仅发生在代表 Q-DCT 系数的 VLC 码字上，在解码器处我们采用了简单的直接拷贝上一帧对应位置上宏块到当前错误宏块位置的方案作为错误隐藏方案。结果显示：

- v 错误条带的检测率为 37%
- v 错误的正确定位率为 4.9%
- v 由于错误隐藏技术无法实施于未被检测到的错误宏块，因此图象序列的主观效果非常差；从图 2-4 我们还可以看到，在解码端重建图象的第 180 帧出现了“移位”现象



图 2-4：一个糟糕的重建图象的例子（第 180 帧）

## 2.4 本章小结

本章对在带宽有限的有误信道（如无线信道）上进行视频传输存在的问题进行了分析，指出了目前比较常用的一种整体解决方案的框架。并且指出在这个框架下在视频解码器端进行的错误隐藏的效率 and 效果依赖于错误检测的结果。

◇ 但是传统的基于语法检测的错误检测方案在检测 Q-DCT 系数错误上存在着很大的缺陷，影响了错误隐藏的效果。这些缺陷体现在

- v 错误条带检测率低
- v 错误正确定位率很低
- v 无法避免“移位”现象的出现

◇ 为了进一步说明该方案的缺陷，还进行了仿真实验并给出了结果

本章隐性地指出了论文工作的重点，为下一章详细地阐述论文工作做了一个铺垫。

## 第三章 数字水印误码检测技术

### 3.1 引言

从第二章我们了解到，传统的基于语法的错误检测方案不能满足实践的要求。本文试图寻找一种效果好、代价小的新方案。借鉴现实生活中人们利用水印来进行版权、篡改验证的思想，本文做了将数字水印技术应用于错误检测中的尝试性工作。

数字水印技术(Digital Watermark)是在近七年发展起来[21]。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[22]-[24]，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：

- ◇ 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。
- ◇ 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。

在文献[25]-[27]中进行了将易碎的数字水印应用于数字媒体防篡改中的尝试，结果表明易碎的数字水印在这方面很有应用潜力。在本文中，**易碎的**数字水印技术被创新性地应用到错误检测中，取得了很好的效果。

值得指出的是，在论文工作进行的同时，Tang[28]提出了用数字水印进行误码检测的建议；Wang[29]提出了一种具体的利用数据隐藏(Data Hiding)和**鲁棒的**数字水印技术协助进行错误检测的方案。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。特别地，文献[29]中还显示，在对Akiyo序列运用Wang提出的“DEMVRVC”技术后造成了2dB的编码PSNR的下降，这是比较严重的。

### 3.2 一般性框架

大体上，我们的想法是在视频数据里嵌入易碎的数字水印，经过传输后，在解码端检测数据里数字水印的完整性，如果水印被破坏，则当前数据肯定是被信道误码所破坏，相反的情况出现时，当前数据则被认为正确的。

那么，对于传统的MC+DCT+VLC编解码系统，应该在哪一种信息里嵌入数字水印呢？是嵌入于头信息、运动信息还是Q-DCT系数信息里？根据表3-1的比较，我们选择了Q-DCT系数信息作为易碎的数字水印的载体。

表 3-1: 水印载体的选择

	被信道误码破坏的概率	被破坏后所带来的后果	出错后是否容易被基于语法的检测方案所发现	水印容量
头信息	低	很严重	容易	很小
运动信息	比较高	比较严重	不太容易	小
Q-DCT 信息	高	严重	困难	大

下面我们来详细阐述一下我们方案的一般性框架。在编码端，在得到量化后的

Q-DCT 系数之后，在其中嵌入易碎的数字水印，然后这些系数被送往 VLC 编码器进行编码。为了避免由于水印嵌入导致的误差漂移(drift)现象，水印的嵌入是在 MC 环路内进行的。采用了本文所提技术的一个典型 MC+DCT+VLC 的编码器结构框图如图 3-2 所示。易碎的数字水印可以被嵌入于宏块级别，如在两个亮度块(Y-block)之间强制能量大小关系；也可以被嵌入于  $8 \times 8$  块级别，如强制块内某两个系数之间的大小关系。在解码端，水印的完整性在解码所得的 Q-DCT 系数上进行检测，由于水印是易碎的，因此任何误码都会破坏水印的完整性，从而对水印完整性的检测就能够指示当前的宏块数据是否被信道误码所损坏。

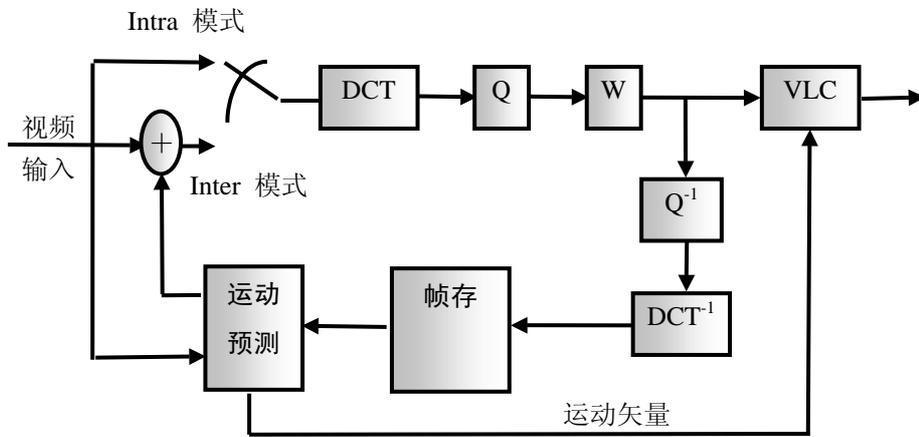


图 3-2: 典型的加入了水印嵌入模块的 MC+DCT+VLC 编码器框架图

W: 水印嵌入模块

在本文方案中，易碎的数字水印被嵌入于任何一个参与编码的 intra-/inter-块。由于 intra-/inter-块、亮度/色度块(Y-/C-block)系数取值的分布特性不同，因此为了达到最佳的效果，嵌入于这些块的数字水印也可以彼此不同。很明显地，本文方案的兼容性也是很好的，因为它并不依赖于其他的技术，同时，编码所得码流的结构并没有发生改变，因此，任何和原来的编码器兼容的解码器就能够对码流进行解码。当然，如果采用了集成了数字水印检测模块的编码器，将在错误检测上有更好的表现。

此外，从图 3-2 还可以看出，由于在 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，错误条带检测率和错误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(Trade-off)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。优化本文方案的过程就是在一定的系统约束条件下选取一个优化的数字水印的过程，优化的目标如下：

- ◇ 最大的错误条带检测率和最大的错误正确定位率，这两个目标实际上是一致的
- ◇ 最小的由于水印嵌入而造成的图象质量的下降，如
 
$$\max \{PSNR(\text{水印嵌入前的图象}, \text{水印嵌入后的图象})\}$$

此外，水印的嵌入不应该使码流的码率有大的增加，否则，在带宽受限信道上的应用将受到限制，而在码率增加的情况下考虑最小图象质量下降考虑也将变得没有意义。通过选取一个优化的数字水印，我们期望这些目标都能够达到，如果代价过大，方案将失去可行性。

### 3.3 数字水印方案 FEW(Force Even Watermarking)

顺着 3.2 节的思想，我们接着提出了一种具体的方案 FEW(Force Even Watermarking)。该方案的提出受到了文献[27]的启发，在  $8 \times 8$  块级别上进行数字水印的嵌入，FEW 的示意图见图 3-3。在该水印方案中，在一个  $8 \times 8$  块内，在一个特定 zig-zag 位置  $pos$  之后的所有 Q-DCT 系数都必须是偶数，如果是奇数要被修改为临近的、绝对值小的偶数。这种强制关系是在编码时对任何一个参与编码的  $8 \times 8$  块的数据嵌入的，而在解码端则检查这种强制关系有没有被破坏。由于所有经过水印嵌入的 Q-DCT 系数都必须是偶数，因此如果在解码的时候发现打过水印的 Q-DCT 系数是奇数，则意味着当前  $8 \times 8$  块上的数字水印已经被破坏，这种情况说明了当前  $8 \times 8$  块的 Q-DCT 系数信息已经被信道误码所破坏，这样一个损坏了的  $8 \times 8$  块就被检测出来了。若一个宏块内有任何一个  $8 \times 8$  块被检测为错误的，则当前宏块必然是错误的；而当且仅当一个宏块内的所有  $8 \times 8$  块上的水印都没有被破坏，我们才认为当前宏块是正确的。当然这里还存在着错误漏检的问题，也即宏块是错误的，但是这些误码所导致的错误并没有使水印的完整性收到损坏。这种漏检的情况显然是不受欢迎的，而减小这种情况出现的概率显然是优化 FEW 的目标之一。

1	2	6	7	15	16	28	29
3	5	8	14	17	27	30	43
4	9	13	18	26	31	42	44
10	12	19	25	32	41	45	54
11	20	24	33	40	46	53	55
21	23	34	39	47	52	56	61
22	35	38	48	51	57	60	62
36	37	49	50	58	59	63	64

```

for i = pos to 64
    ACi = sign(ACi) ×
            even(abs(ACi))
end

even(x) = { x    if x is even
           { x-1  if x is odd
    
```

图 3-3: FEW 示意图

这里，我们定义水印检测函数为：

$$W(f) = \begin{cases} 0 & \text{if } abs(f) \text{ is even} \\ 1 & \text{if } abs(f) \text{ is odd} \end{cases} \quad (3-1)$$

在解码器端，通过检测得到在一个  $8 \times 8$  块的 Q-DCT 系数上嵌入的数字水印序列为  $w(i) = W(AC_i)$   $i = pos, \dots, 64$ ，这里  $AC_i$  是  $8 \times 8$  块内的 Q-DCT 系数。这样我们可以定义一个错误发生判断函数(Error Assessment Function, EAF)：

$$EAF(w) = \frac{1}{L} \sum_{pos}^{64} w(i) \quad L = 64 - pos \quad (3-2)$$

EAF 的取值范围为[0, 1]。为了判断是否需要启动错误隐藏例程，我们定义了一个阈值  $T(0 \leq T \leq 1)$ ，当  $EAF(w) > T$  时我们对当前错误的宏块启动错误隐藏例程；而当  $EAF(w) \leq T$  时，认为当前的  $8 \times 8$  块是没有错误的，或者是这样的错误是可以被忽略的。这样的考虑是因为在有些时候仅仅因为有一个高阶 Q-DCT 系数发生错误而进行错误隐藏的重建图象，反而不如不进行错误隐藏所产生的重建图象质量好。

### 3.4 本章小结

在本章中

◇ 我们提出了利用易碎的数字水印技术来进行传输错误检测的想法、一般性框

架和一个具体的方案

通过在编码端在 Q-DCT 系数上嵌入易碎的数字水印，并且在解码端检测宏块上水印的完整性，视频解码器能够轻松地检测出被信道误码破坏的宏块。在进行一般性分析时，本章指出该技术具有很好的灵活性和足够的兼容性。

◇ 给出了方案优化的目标和优化过程中存在的一个折衷(Trade-off)关系

◇ 详细地阐述了一种具体的 FEW 方案

下一章将对具体的方案进行必要的理论分析，以期能够对方案的优化起一个指导作用。

## 第四章 对 FEW 的理论分析

首先，我们先定义一下下面要用到的一些符号和表达式。

表 4-1: 预先定义的符号和函数

$OAC_i \quad i = 2, 3, \dots, 64$	编码器经过 DCT 变换后得到的 $8 \times 8$ 块内的 63 个 AC 系数
$AC_i \quad i = 2, 3, \dots, 64$	编码器经过 DCT 变换和量化后得到的 $8 \times 8$ 块内的 63 个 AC 系数
$AC_i^w = \begin{cases} AC_i & \text{if }  AC_i  \text{ is even} \\ AC_i - \text{sign}(AC_i) & \text{if }  AC_i  \text{ is odd} \end{cases}$ $i = pos, \dots, 64$	编码器经过 DCT 变换和量化后，再嵌入数字水印后得到的 $8 \times 8$ 块内的 $L$ 个 AC 系数
$OAC_i' \quad i = pos, \dots, 64$	编码器经过 DCT 变换和量化，再进行反量化得到的 $8 \times 8$ 块内的 63 个 AC 系数
$OAC_i^{w'} \quad i = pos, \dots, 64$	编码器经过 DCT 变换、量化和嵌入数字水印，再进行反量化得到的 $8 \times 8$ 块内的 $L$ 个 AC 系数
$\widetilde{AC}_i \quad i = 2, 3, \dots, 64$	经过传输后，解码器解码得到的 $8 \times 8$ 块内的 63 个 AC 系数
$\widetilde{AC}_i^w \quad i = pos, \dots, 64$	经过传输后，解码器解码得到的 $8 \times 8$ 块内的 $L$ 个嵌入了数字水印的 AC 系数
$n_i \quad i = 2, 3, \dots, 64$	加载在第 $i$ 个 AC 系数上的 AGN 噪声。均值为 0，方差为 $\sigma_n^2$
$\widetilde{w}(i) = W(\widetilde{AC}_i) \quad i = pos, \dots, 64$	在解码所得的 $L$ 个嵌入了数字水印的 AC 系数上检测得到的数字水印序列。W(.) 见式(3-1)
$\text{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-t^2} dt$	传统误差函数

$sign(\cdot)$	符号函数。自变量为正数则返回 1，反之则返回 -1
$abs(f)$	绝对值函数。返回自变量的绝对值
$\lfloor f \rfloor \quad f \geq 0$	取整函数 a，函数的取值为最靠近自变量的比自变量小的整数
$\lceil f \rceil \quad f \geq 0$	取整函数 b，函数的取值为最靠近自变量的比自变量大的整数

### 4.1 错误检测率的分析

为了分析错误检测率，我们需要一个加在 Q-DCT 系数上的噪声模型，这里我们采用了在很多文献中都采用的常用的加性高斯噪声(Additive Gaussian Noise, AGN)模型。假设每一个 Q-DCT 系数上的失真为均值为零、方差为  $\sigma_n^2$  的加性高斯噪声，则我们可以通过推导得到错误正确定位率和系统参数以及水印参数之间的函数关系。

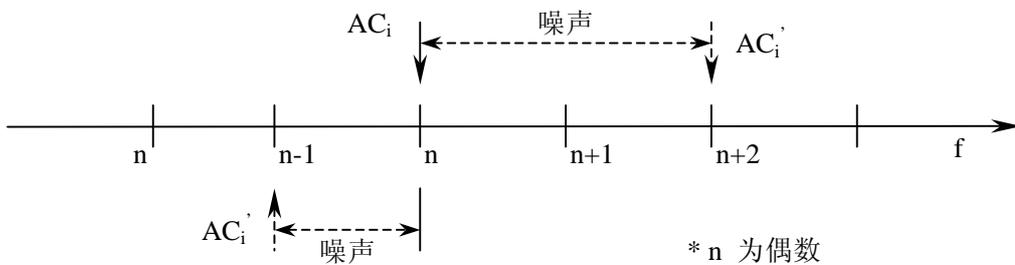


图 4-1: 嵌入了水印的系数被信道噪声所改变，因此水印可能被破坏

由于 Q-DCT 系数经过传输后发生了失真，因此可能导致嵌入于系数的数字水印也发生变化。图 4-1 显示了系数失真造成的水印的变化。每个 Q-DCT 系数经过传输后，经解码后得到的系数及其无误传输的概率为：

$$\widetilde{AC}_i = AC_i + sign(n) \times \lfloor abs(n_i) + 0.5 \rfloor \quad (4-1)$$

$$P\{\widetilde{AC}_i = AC_i\} = P\{0 \leq |n_i| < 0.5\} = erf\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right) \quad (4-2)$$

这样，我们容易得到第  $i$  位解码端检测到的水印比特  $\tilde{w}(i)$  为 0 的概率为：

$$\begin{aligned}
 P\{\tilde{w}(i)=0\} &= P\{\widetilde{AC}_i \bmod 2 = 0\} \\
 &= P\{(AC_i + \text{sign}(n_i) \times \lfloor |n_i| + 0.5 \rfloor) \bmod 2 = 0\} \\
 &= P\{2k - 0.5 \leq |n_i| < 2k + 0.5, k = 1, 2, \dots\} + P\{0 \leq |n_i| < 0.5\} \\
 &= \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \text{erf}\left(\frac{2k+0.5}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) - \text{erf}\left(\frac{2k-0.5}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \right] \quad (4-3)
 \end{aligned}$$

在计算错误正确定位率时，我们先考虑阈值  $T$  为 0 的情况，然后再考虑  $T$  不为 0 的情况。错误正确定位率应该为在当前宏块的 Q-DCT 系数信息发生错误时，错误判断函数给出错误报告的概率。当  $T=0$  时（这里假设一个宏块里有 6 个  $8 \times 8$  块）：

$$\begin{aligned}
 P_{ed\_MB} &= P\{EAF(\tilde{w}) > 0 \mid \widetilde{AC} \neq AC\} \\
 &= \frac{P\{EAF(\tilde{w}) > 0\}}{P\{\widetilde{AC} \neq AC\}} \times P\{\widetilde{AC} \neq AC \mid EAF(\tilde{w}) > 0\} \\
 &= \frac{1 - \left[ \prod_{pos}^{64} P\{\tilde{w}(i) = 0\} \right]^6}{1 - P\{\widetilde{AC} = AC\}} \times 1 \\
 &= \frac{1 - \left\{ \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \text{erf}\left(\frac{2k+0.5}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) - \text{erf}\left(\frac{2k-0.5}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \right] \right\}^{6L}}{1 - \left[ \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right) \right]^{64 \times 6}} \quad (4-4)
 \end{aligned}$$

特别地，当失真特别严重的时候，即  $\sigma_n^2$  非常大的时候，传统误差函数的取值趋近于 0，则此时的错误正确定位率为：

$$P_{ed\_MB} \approx 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{6L} \quad (4-5)$$

当阈值  $T$  不等于 0 时，错误的正确定位率为：

$$\begin{aligned}
 P_{ed\_MB} &= P\{EAF(\tilde{w}) > T \mid \widetilde{AC} \neq AC\} \\
 &= \frac{P\left\{\sum_{i=pos}^{64} \tilde{w}(i) > T \cdot L\right\}}{P\{\widetilde{AC} \neq AC\}}
 \end{aligned} \tag{4-6}$$

式(4-6)的右边的分子部分相当于数字水印序列  $\tilde{w}$  里至少有  $\lceil T \cdot L \rceil$  个 '1' 的概率。因此, (4-6)式可以进一步推导成为:

$$P_{ed\_MB} = \frac{\sum_{k=\lceil TL \rceil}^L \binom{N}{k} (1 - P\{\tilde{w}(i) = 0\})^k (P\{\tilde{w}(i) = 0\})^{L-k}}{1 - \left[ \text{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right) \right]^{64 \times 6}} \tag{4-7}$$

式(4-4)和(4-7)给出了错误的正确定位率和数字水印参数  $pos$ 、错误判断阈值  $T$  之间的函数关系。根据这些函数关系式, 我们可以根据给定的参数值来分析数字水印检测错误的性能; 反之, 我们也可以根据所要求达到的性能来设计水印参数和错误判断阈值。从函数关系式可以看出, 若要提高错误检测的性能, 则需要降低阈值  $T$ , 或者减小  $pos$  的取值。

## 4.2 由于水印嵌入而导致的图象质量下降的分析

在本小节内, 我们将分析由于水印嵌入而导致的图象质量下降, 和量化参数  $QP$  以及水印参数  $pos$  之间的关系。这里我们用  $PSNR$ (水印嵌入前的图象, 嵌入后的图象)来衡量图象质量的下降, 该  $PSNR$  越大, 表明图象质量的下降越小。

首先, 我们先在一定的假设基础上, 对水印嵌入前后的图象之间的 DCT 域上的均方误差(Mean Squared Error)的期望值, 也即  $E(\text{MSE}_{\text{DCT}})$ , 进行分析; 得到其与水印参数  $pos$  和量化参数  $QP$  之间的函数关系。然后, 由于 DCT 变换是一个正交的线性变换, 再根据帕萨瓦尔定理[30], DCT 域上的均方误差实际上就等于空域上的均方误差, 也即式(4-8), 其证明可参见附录 A。

$$\text{MSE}_{\text{DCT}} = \text{MSE}_{\text{Spatial}} \tag{4-8}$$

这样一来，我们就可以通过(4-9)式来计算  $PSNR$ ：

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{255^2}{E(MSE_{Spatial})} \right] = 10 \log_{10} \left[ \frac{255^2}{E(MSE_{DCT})} \right] \quad (4-9)$$

下面，我们开始依照这个思路来进行我们的分析工作。首先，从文献[31][33]我们知道，intra 块的经 DCT 变换后所得的 AC 系数符合拉普拉斯(Laplacian)分布，或者更精确地说，符合一致高斯分布(Generalized Gaussian Distribution, GGD)；此外文献[32]告诉我们，在经过了运动预测后得到地 inter 块的经 DCT 变换后所得的 AC 系数也符合拉普拉斯(Laplacian)分布。因此，在开始我们的推导工作之前，我们依照文献做了一个很重要的假设：intra 块和 inter 块的经 DCT 变换后所得的 AC 系数服从参数不同的拉普拉斯(Laplacian)分布：

$$p(x) = \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda|x|}, \lambda = \frac{1}{E(|X|)} \quad (4-10)$$

由于我们考虑的是量化后图象之间的量化的差别，因此必须在一个特定的量化反量化函数下来考虑。在本文中，我们采用了 H.26x 协议中的量化和反量化函数。对于其他的量化函数，有相同的流程和计算思想：

*Intra-block :*

$$\text{Quantization: } AC_i = \left\lfloor \frac{OAC_i}{2QP} \right\rfloor$$

$$\text{Dequantization: } OAC_i' = \begin{cases} (2AC_i + \text{sign}(AC_i))QP - \text{sign}(AC_i)QP_0 & AC_i \neq 0 \\ 0 & AC_i = 0 \end{cases}$$

$$QP_0 = \begin{cases} 1 & QP \text{ is even} \\ 0 & QP \text{ is odd} \end{cases}$$

-----  
*Inter-block :*

$$\text{Quantization: } AC_i = \left\lfloor \frac{OAC_i}{2QP} + 0.5 \right\rfloor$$

$$\text{Dequantization: } OAC_i' = \begin{cases} (2AC_i + \text{sign}(AC_i))QP - \text{sign}(AC_i)QP_0 & AC_i \neq 0 \\ 0 & AC_i = 0 \end{cases}$$

$$QP_0 = \begin{cases} 1 & QP \text{ is even} \\ 0 & QP \text{ is odd} \end{cases}$$

这里我们先对 intra 块的情况进行计算，然后根据同样的道理可以得到 inter 块的

结果。从  $AC_i^w$  的表达式我们知道，只有那些为奇数的 AC 系数才会在水印嵌入的过程中被改变，而且改变前后的绝对值之差恒为 1。这样一来，在对应的  $OAC_i'$  和  $OAC_i^w$  之间的平方误差的期望值为：

$$\begin{aligned}
 E\left(\left|OAC_i' - OAC_i^w\right|^2\right) &= E\left\{P\{|AC_i|=1\} \times |3QP - QP_0|^2\right\} \\
 &\quad + E\left\{P\{|AC_i|\neq 1\} \times |2QP(AC_i - AC_i^w)|^2\right\} \\
 &= 2(3QP - QP_0)^2 \int_{2QP}^{4QP} \frac{\lambda_i}{2} e^{-\lambda_i x} dx + 8QP^2 \sum_{k=2}^{\infty} \int_{(2k-1)2QP}^{4kQP} \frac{\lambda_i}{2} e^{-\lambda_i x} dx \\
 &= (3QP - QP_0)^2 \times (e^{-2QP\lambda_i} - e^{-4QP\lambda_i}) + 4QP^2 \sum_{k=2}^{\infty} [e^{-2(2k-1)\lambda_i 2QP} - e^{-4k\lambda_i 2QP}] \\
 &= (e^{-2QP\lambda_i} - e^{-4QP\lambda_i})(3QP - QP_0)^2 + 4QP^2 (e^{2\lambda_i 2QP} - 1) \sum_{k=2}^{\infty} e^{-4k\lambda_i 2QP} \\
 &= (e^{-2QP\lambda_i} - e^{-4QP\lambda_i})(3QP - QP_0)^2 + 4QP^2 \frac{e^{-6\lambda_i 2QP}}{1 + e^{-\lambda_i 2QP}}
 \end{aligned} \tag{4-11}$$

在(4-11)式中， $\lambda_i$   $i=2,3,\dots,64$  是不同 AC 系数的拉普拉斯分布的参数值。借助(4-11)式的帮助，我们可以进一步推导得到：

$$\begin{aligned}
 E(MSE_{DCT}) &= \frac{1}{64} \sum_{i=pos} E\left(\left|OAC_i' - OAC_i^w\right|^2\right) \\
 &= \frac{(3QP - QP_0)^2}{64} \sum_{i=pos} (e^{-2QP\lambda_i} - e^{-4QP\lambda_i}) + \frac{QP^2}{16} \sum_{i=pos} \frac{e^{-6\lambda_i 2QP}}{1 + e^{-\lambda_i 2QP}}
 \end{aligned} \tag{4-12}$$

(4-12)是对 intra 块进行分析的结果。同样的道理和流程，我们可以得到 inter 块的分析结果：

$$E(MSE_{DCT}) = \frac{(3QP - QP_0)^2}{64} \sum_{i=pos} (e^{-QP\lambda_i} - e^{-3QP\lambda_i}) + \frac{QP^2}{16} \sum_{i=pos} \frac{e^{-5\lambda_i 2QP}}{1 + e^{-2\lambda_i 2QP}} \tag{4-13}$$

根据(4-12)、(4-13)和(4-9)式，我们就可以得到在 intra-/inter-块的情况下，由于水印嵌入而导致的图象质量下降和各参数之间的关系。根据这些函数关系式，我们可以根据给定的参数值来分析数字水印对图象质量的影响；反之，我们也可以根据所要求达到的性能来设计水印参数和量化参数。从函数关系式可以看出，若要减小对图象质量的影响，可以减小  $QP$ ，或者增大  $pos$  的取值。

### 4.3 实验验证和一个重要的折衷(Trade-off)

在本小节内，我们将通过实验对 4.2 节得到的理论分析结果做一个验证。在实验中，我们用 TMN8 编解码器对 CIF 格式的 Cost Guard 序列进行压缩，然后我们通过实验计算了水印嵌入前后图象间的  $PSNR$ 。实验中，我们取量化参数  $QP$  为 7 和 10；水印参数  $pos$  对  $intra$  块取 24 到 44，对  $inter$  块取 14 到 34。这样我们就分别得到  $intra$  块和  $inter$  块情况下  $PSNR$  的实验曲线。同时，在实验中，我们还顺便通过统计的方法得到了  $intra$ -/ $inter$ -块内 AC 系数拉普拉斯分布的参数  $\lambda_i$ ， $i = pos, pos + 1, \dots, 64$ 。然后通过给定的参数和式(4-12)、(4-13)和(4-9)，我们得到了  $PSNR$  的理论曲线。进而在图 4-2 和图 4-3 我们对理论曲线和实验曲线进行了比较。比较的结果显示，两条曲线是相当匹配的。在  $intra$  块的 DCT 系数的分布不是很符合拉普拉斯分布的情况下，可能会出现曲线不匹配的情况，这是因为  $intra$  块的 DCT 系数只是近似符合拉普拉斯分布，更加精确地，这些系数实际上更加符合一致高斯分布(GGD)。因此，如果采用了一致高斯分布进行分析，可以得到更加精确的、可以应用得更加广泛的结果。但是，这里的结果我们认为已经是足够好的了，而且本文提出的分析方法也具有普遍的意义。

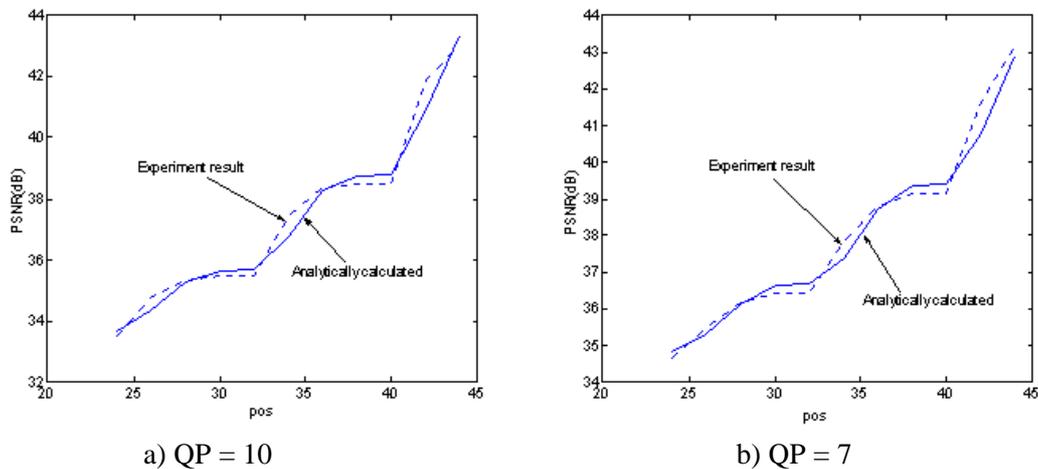


图 4-2: 理论计算得到的  $PSNR$  曲线和实验结果的比较 ( $intra$  块)

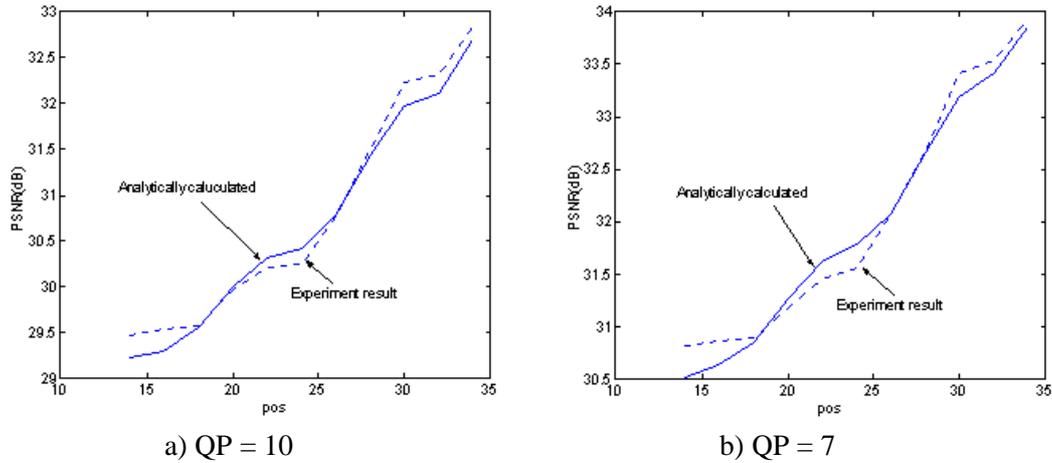


图 4-3: 理论计算得到的  $PSNR$  曲线和实验结果的比较 (inter 块)

这样一来, 通过式(4-4)、(4-7)、(4-12)、(4-13)和(4-9), 我们可以评价数字水印方案的易碎性和造成的图象质量的下降。反过来, 在系统参数, 如编码器量化参数  $QP$ 、噪声方差  $\sigma_n^2$ , 各拉普拉斯分布参数  $\lambda_i, i = 2, 3 \dots 64$  已知的情况下, 我们可以根据要求的错误正确定位率  $P_{ed\_MB}$  和允许的  $PSNR$ , 来设计水印的参数  $pos$ 。此外, 从这些关系式中也可以很容易地明白, 由于对 intra-/inter-块、Y/C 块, 它们的一些参数可能是不同的, 如  $\lambda_i, i = 2, 3 \dots 64$  和  $\sigma_n^2$ , 所以在相同的性能下, 这些块上的数字水印参数也可以不同。

此外, 这些关系式还验证了第三章提出的一个论断, 即在高的错误正确定位率和低的图象质量损失之间, 存在着一个折衷(Trade-off)。这样的折衷显示, 在进行数字水印优化的时候, 单纯考虑错误正确定位率或者图象质量损失都是没有意义的, 所谓的数字水印优化, 就是要在固定一者的情况下, 寻求另一性能的最优。这和有些优化问题里, 各优化目标之间是相互独立的这一点是不同的。在图 4-4 中, 我们给出了理论给出关于错误正确定位率和图象质量损失之间的折衷图。从图中我们还发现一个有意思的现象, 即在同样的失真水平下, 水印方案在  $QP$  为 10 时的表现要优于在  $QP$  等于 7 的时候的表现。直接一点的想法会认为  $QP$  越大, 当有系数被修改的时候, 带来的失真也应该是越大的才对。但是从另一个角度来考虑, 当  $QP$  增大的时候, 有更多的系数被量化为 0, 因此有少得多的系数被水印嵌入过程所修改, 因此, 虽然每次修改所带来的失真要大一些, 但是因为修改次数变少了, 在一定的错误定位率的情况下, 总体的失真反

而减小了。

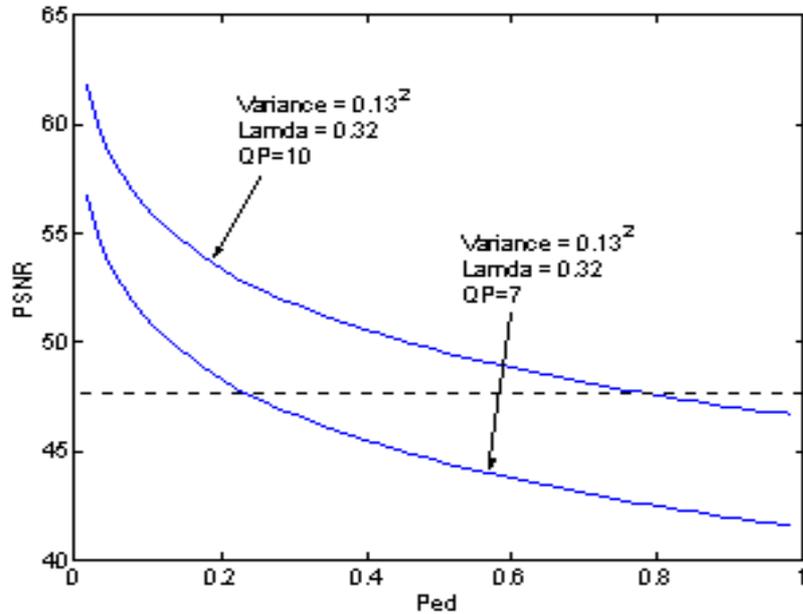


图 4-4: 错误正确定位率和图象质量损失之间的折衷示意图

#### 4.4 本章小节

在本章中，我们

- ◇ 给出了 FEW 水印方案的两个理论模型
- ◇ 在这两个模型中，我们分别推导得到了几个关于错误正确定位率、图象质量损失和水印参数、系统参数之间关系的解析表达式

根据这些表达式，我们可以评估水印方案的错误正确定位率和所造成的图象质量损失。同时，我们还了解到，水印方案的性能由水印参数  $pos$  和编码器量化参数  $QP$  所决定，这对在一定性能要求下进行水印的设计有指导作用

- ◇ 本文的理论分析对于典型 MPEG 应用中的视频序列在高误码率信道情况下的应用有最好的匹配

此外，我们还从理论上指出和验证了第三章的有关折衷的论断。

## 第五章 实验结果

### 5.1 实验目的

理论分析假设和试验证明，第四章中提出的理论分析结果对于高速码率（如 MPEG-1, 2）应用中的视频序列在高误码率信道情况下的应用有最好的匹配。在低速码率（比如 H.263, CIF, 300Kbps 以下）应用序列由于 Q-DCT 系数模型匹配的误差程度不够好，理论结果和试验结果有偏差。但是出于以下几条理由，我们还是选择了 H.263 典型应用进行实验：

- ◇ 在目前为止，H.263 在低码率视频传输上应用很广泛。因此我们认为，以传输前景为景物、背景基本上没有大的运动的 H.263 典型应用在低码率上的成功使得它在无线视频传输上将有比较光明的前景
- ◇ 本人和本实验室在 H.263 编解码和传输上有很好的理论、技术和技能基础，使得本文提出的技术可以比较快、比较灵活地实现。更容易深入地发现和解决一些问题
- ◇ 基于 H.263 应用的实验仍然可以说明 FEW 方案的性能表现，并且能够印证理论分析时指出的优化目标之间的折衷关系
- ◇ 我们提出的理论分析的思路和方法有普遍意义，对于 H.263 的应用，我们只需要将 DCT 系数的模型换成和 H.263 应用大致匹配的模型即可得出有具体指导意义的理论结果

在仿真实验中，我们将对不同的错误检测和定位方案的性能进行评估。方案的性能包括两方面，一是错误条带检测率和错误正确定位率；二是该方案带来的图象质量的下降，对于这一点我们将从主观质量和 PSNR 来进行比较。实验中计算 PSNR 的公式如下：

$$PSNR(f, z) = 10 \log_{10} \left[ \frac{\left( \max_{\forall(m,n)} f(m,n) \right)^2}{\frac{1}{N_f} \sum_{\forall(m,n)} (z(m,n) - f(m,n))^2} \right] \quad (5-1)$$

根据公式计算得到的 PSNR 的单位是 dB，式中  $f(m,n)$  为原始图象， $z(m,n)$  为需

要比较的图象。 $N_f$  为  $f(m,n)$  或  $z(m,n)$  中的象素点数。

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。

## 5.2 实验环境

本文实验利用 TMN8 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试和比较，这里选取其中的 3 个具有代表性的标准测试序列——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 由于背景静止，单人头肩只有缓慢运动，我们称其为简单视频源。而 Car Phone 由于背景有运动，前景人物有较剧烈的运动，尤其是垂直于图象平面的运动，我们称其为复杂视频源。实验中选取了每个序列的 240 帧逐行的 CIF(352×288 象素，YUV 4:2:0)序列作为视频源，编码帧率为 30 帧/秒。

集成了数字水印嵌入模块的 H.263 编码器框图见图 5-1。整个通信系统的框图如图 5-2 所示。其中，本文选择随机误码率(Bit Error Rate, BER)为  $5 \times 10^{-4}$  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。

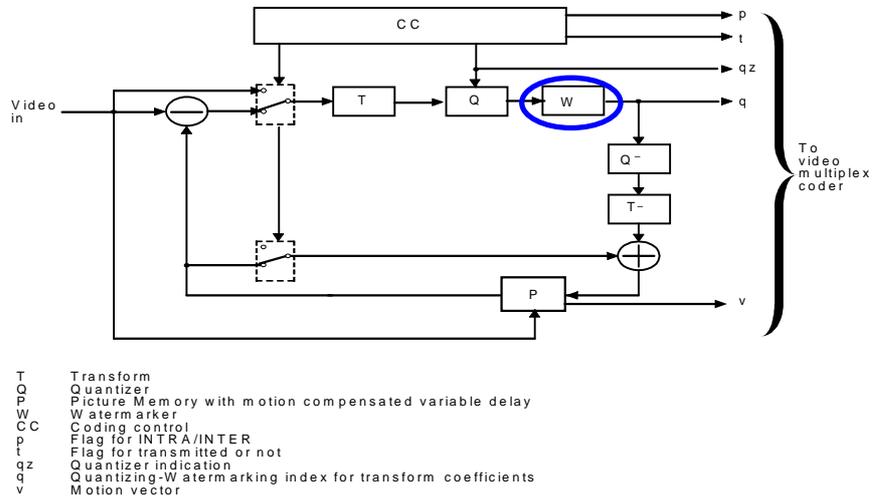


图 5-1: 集成了水印嵌入模块的 H.263 编码器

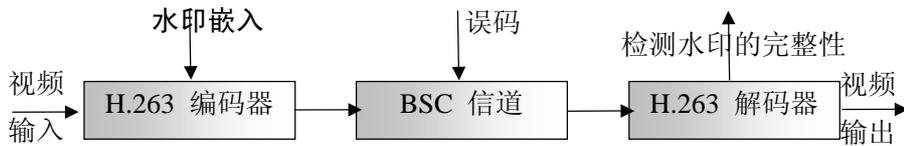


图 5-2: 仿真系统框图

在实验中，我们设定的系统参数和数字水印的参数为：

表 5-1: 仿真实验中的系统参数和水印参数

参数	取值	
水印参数 <i>pos</i>	Intra_Y_block	36
	Inter_Y_block	21
	Intra_C_block	15
	Inter_C_block	15
错误判断阈值 <i>T</i>	0.0	

编码器量化参数 $QP$	对 inter-/intra-frame 都取恒定值 10
编码帧率	30 帧/秒
信道随机误码率(BER)	$5 \times 10^{-4}$ 或者 $1 \times 10^{-3}$

### 5.3 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（表 5-2~表 5-4）可以看出，相比传统方案，本文方案在错误判断阈值  $T=0$  的时候，错误条带检测率提高了 61%~117%，对错误隐藏效果有决定性影响的错误正确定位率提高了 330%~1300%，而编码  $\overline{PSNR}$  下降在 0.5dB 的范围以内，码流码率没有增加。同时我们从表中和图 5-6 还可以看到，由于错误的正确定位率有了本质性的提高，又因为我们主要依赖于对水印的检测来发现错误，因此对图 2-3 所显示的“移位”现象的避免比传统方案好得多。

图 5-3 显示了在 BER 为  $5 \times 10^{-4}$  的情况下，在整个系统仅有错误检测方案不同的情况下，接收端重建图象序列中第 50、100、150、180 和 200 帧的比较，通过这些比较我们可以看出本文方案表现的稳定性。在该实验中，我们选取了简单的复制前一帧适当位置的数据到当前位置这样一种技术作为错误隐藏技术，为了配合这一技术，我们在传输视频码流的过程中，不在第一帧的数据上加载误码。从图 5-3 中可以看出，由于本文方案在性能上相比传统方案有突破，因此即使在相同的造成了重建图象的质量有明显的改善。此外，在图 5-4 中还给出了不同错误检测方案下编码  $PSNR$  和解码  $PSNR$  的比较。

特别地，在实验中，我们还进行了在不同参数下对本文方案的测试，这些参数包括水印参数  $pos$ ，错误判断阈值  $T$ ，编码器量化参数  $QP$  以及信道误码率 BER，见表 5-5~表 5-7 和图 5-5。从表 5-5 和图 5-5 中我们看到在不同水印参数下方案的性能，其中很明显地，在高的错误检测能力和小的图象质量下降之间存在一个折衷，正如第三和第四章里提到的那样。

表 5-2: Akiyo 序列

## 第五章 实验结果

错误检测方案	编码码率 (Kbits/s)	错误条带检测 率 (%)	错误正确定位 率 (%)	编码平均 PSNR(dB)	$\Delta PSNR$ (dB)
基于语法 (BER= $10^{-3}$ )	92.56	34.98	4.93	36.45	--
基于语法 (BER= $5 \times 10^{-4}$ )	92.56	28.9	11.3	36.45	--
本文方案 (BER= $10^{-3}$ )	85.91	56.41	43.42	35.79	0.24
本文方案 (BER= $5 \times 10^{-4}$ )	85.91	62.92	49.44	35.79	0.24

表 5-3: Mother and Daughter 序列

错误检测方案	编码码率 (Kbits/s)	错误条带检测 率 (%)	错误正确定位 率 (%)	编码平均 PSNR(dB)	$\Delta PSNR$ (dB)
基于语法 (BER= $10^{-3}$ )	158.14	28.13	7.57	34.95	--
基于语法 (BER= $5 \times 10^{-4}$ )	158.14	31.1	6.0	34.95	--
本文方案 (BER= $10^{-3}$ )	151.31	63.73	40.93	34.49	0.28
本文方案 (BER= $5 \times 10^{-4}$ )	151.31	62.25	48.53	34.49	0.28

表 5-4: Car Phone 序列

错误检测方案	编码码率 (Kbits/s)	错误条带检测 率 (%)	错误正确定位 率 (%)	编码平均 PSNR(dB)	$\Delta PSNR$ (dB)
基于语法 (BER= $10^{-3}$ )	333.76	37.0	4.9	35.36	--
基于语法 (BER= $5 \times 10^{-4}$ )	333.76	35.91	3.4	35.36	--
本文方案 (BER= $10^{-3}$ )	306.18	62.64	45.42	34.53	0.44
本文方案 (BER= $5 \times 10^{-4}$ )	306.18	62.17	49.64	34.53	0.44

表 5-5: Car Phone 序列—不同水印参数下方案性能的比较

错误检测方案	编码码率 (Kbits/s)	错误条带检测 率 (%)	错误正确定位 率 (%)	编码平均 PSNR(dB)	$\Delta PSNR$ (dB)
本文方案 ( $pos=22$ , BER= $10^{-3}$ )	306.62	59.34	36.42	34.51	0.46
本文方案 ( $pos=22$ , BER= $5 \times 10^{-4}$ )	306.62	63.12	40.35	34.51	0.46
本文方案 ( $pos=37$ , BER= $10^{-3}$ )	313.71	44.51	23.12	34.78	0.28
本文方案 ( $pos=37$ , BER= $5 \times 10^{-4}$ )	313.71	47.45	28.31	34.78	0.28

表 5-6: Car Phone 序列—不同错误判断阈值下方案性能的比较

## 第五章 实验结果

错误检测方案	编码码率 (Kbits/s)	错误条带检测 率 (%)	错误正确定位 率 (%)	编码平均 PSNR(dB)	$\Delta PSNR$ (dB)
本文方案 ( $T=0.023, BER=10^{-3}$ )	306.18	60.28	43.21	34.53	0.44
本文方案 ( $T=0.023, BER=5 \times 10^{-4}$ )	306.18	60.34	47.52	34.53	0.44
本文方案 ( $T=0, BER=10^{-3}$ )	306.18	62.64	45.42	34.53	0.44
本文方案 ( $T=0, BER=5 \times 10^{-4}$ )	306.18	62.17	49.64	34.53	0.44

表 5-7: Car Phone 序列—不同量化参数下方案性能的比较

错误检测方案	编码码率 (Kbits/s)	错误条带检测 率 (%)	错误正确定位 率 (%)	编码平均 PSNR(dB)	$\Delta PSNR$ (dB)
本文方案 ( $QP=11, BER=10^{-3}$ )	279.76	57.11	44.22	34.15	0.48
本文方案 ( $QP=11, BER=5 \times 10^{-4}$ )	279.76	56.51	43.51	34.15	0.48
本文方案 ( $QP=10, BER=10^{-3}$ )	306.18	62.64	45.42	34.53	0.44
本文方案 ( $QP=10, BER=5 \times 10^{-4}$ )	306.18	62.17	49.64	34.53	0.44



第 50 帧



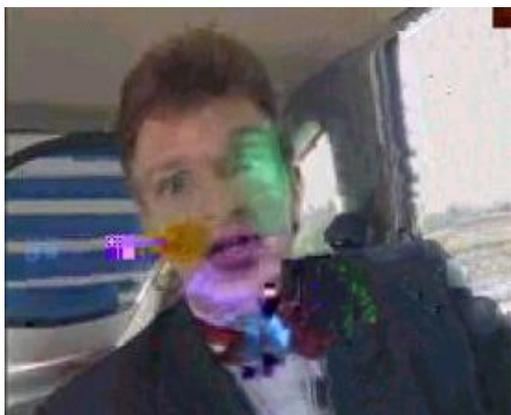
第 50 帧



第 100 帧



第 100 帧



第 150 帧



第 150 帧



第 180 帧



第 180 帧



第 200 帧

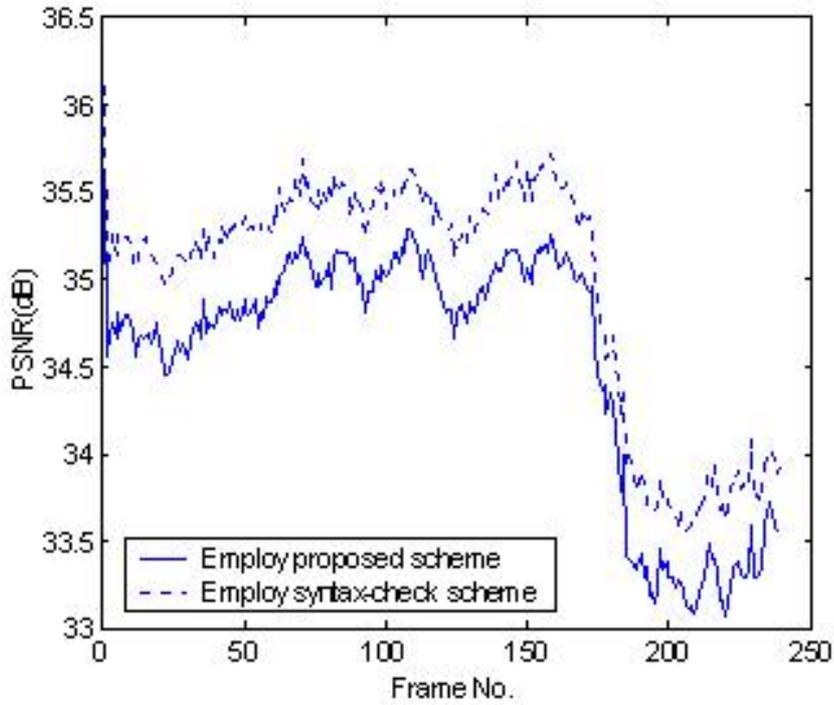


第 200 帧

(a) 采用传统的基于语法检测的方案

(b) 采用本文方案

图 5-3: 不同错误检测方案下所得重建图象间的比较



a) 编码 PSNR 的比较

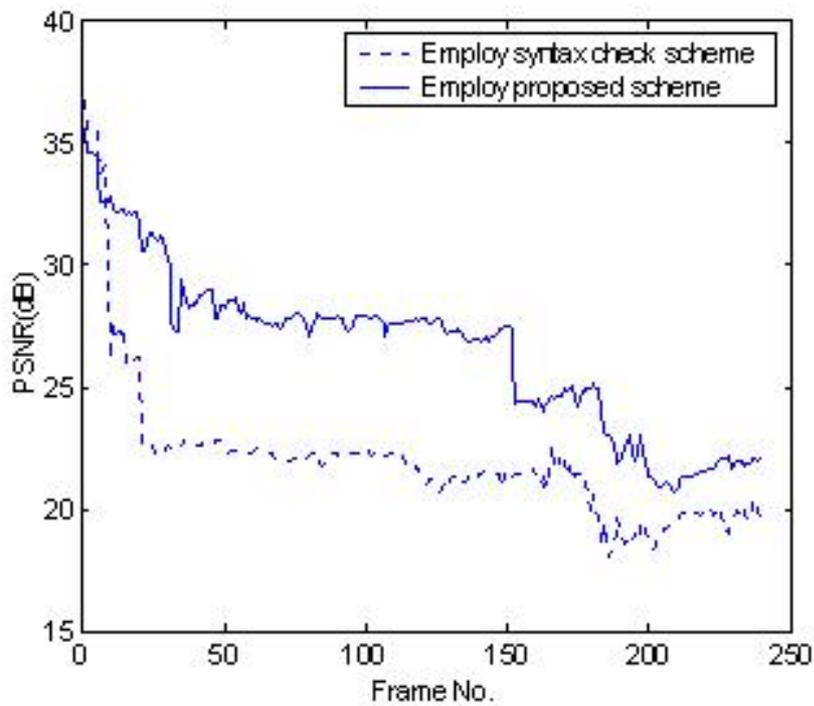
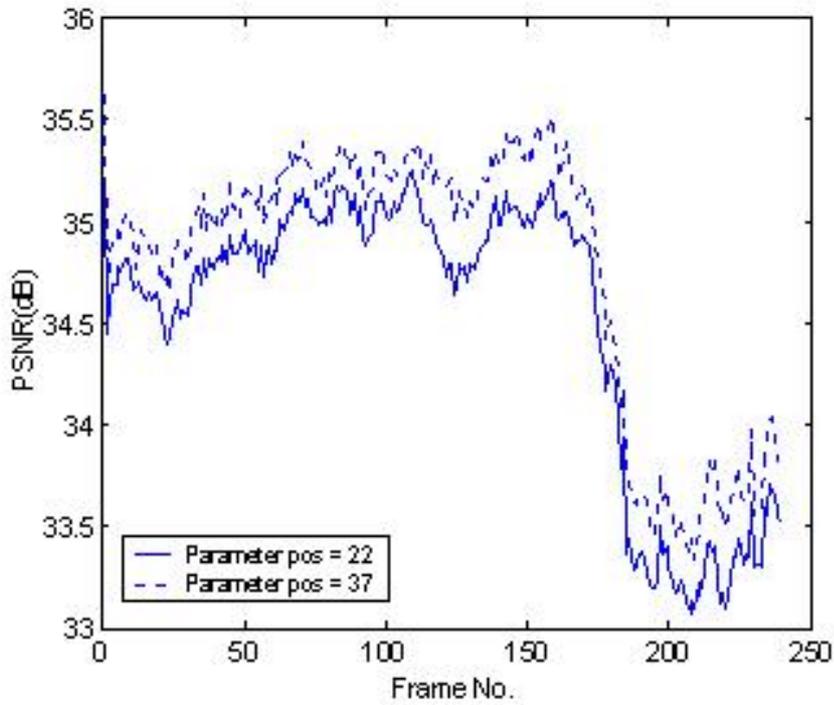
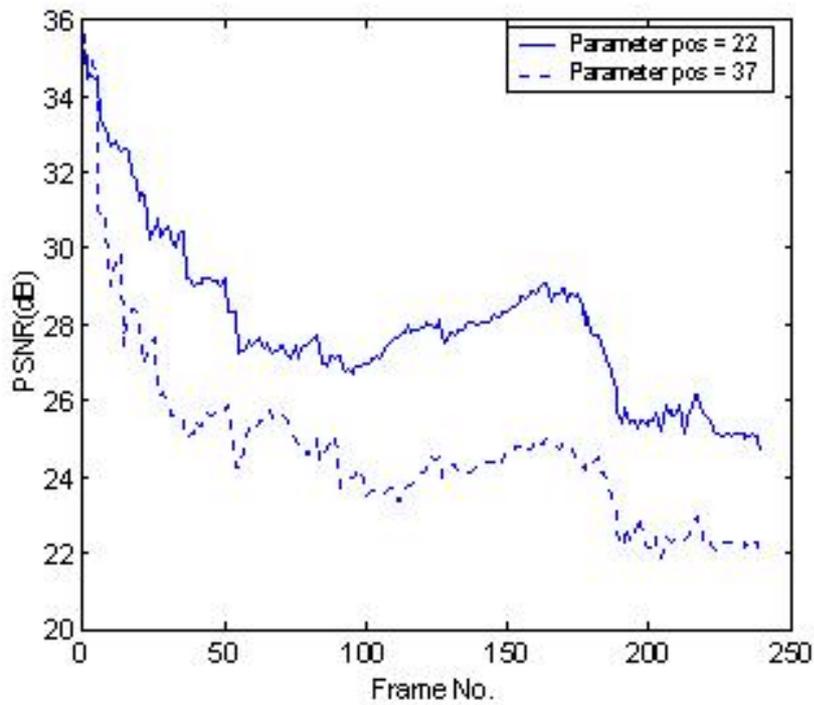


图 5-4: 不同错误检测方案下所得编码端 PSNR 及重建图象 PSNR 间的比较



a) 编码  $PSNR$  的比较



b) 解码端重建图象  $PSNR$  间的比较

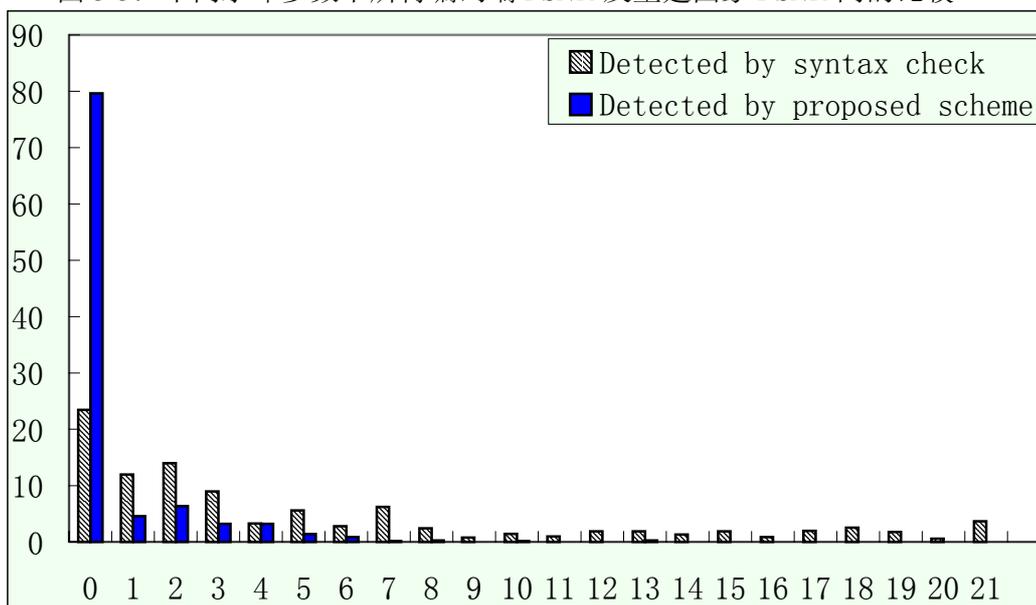
图 5-5: 不同水印参数下所得编码端  $PSNR$  及重建图象  $PSNR$  间的比较

图 5-6: 错误检测结果随错误检测相对位置的分布图

水平座标: 错误检测位置和错误发生位置之间的相对距离 (单位: 宏块)

垂直座标: 在当前相对距离上检测出来的错误数/总检测出来的错误数 (单位: %)

## 5.4 本章小结

在本章中

- ◇ 我们对本文提出的基于水印的错误检测方案进行了评估, 并和传统的基于语法的错误检测方案进行了对比
  - v 对于错误检测能力测试结果: 相比传统方案, 本文方案在错误判断阈值  $T=0$  的时候, 错误条带检测率提高了 61%~117%, 对错误隐藏效果有决定性影响的错误正确定位率提高了 330%~1300%。Wang 的方案可以将正确定位率提高 10%~30%
  - v 码流码率的变化测试结果: 本文方法在加入数字水印后, 并没有引入额外的数码率开销
  - v 接收端重建图象的主观质量测试结果: 基于语法检测的方案有大面积图象损伤, 导致解码图象质量不可接受。本文方案只有局部小块损伤, 整

体图象质量可接受

- v *PSNR* 的比较测试结果：相对于基于语法的方案，本文方案带来的额外 *PSNR* 下降在 0.5dB 以内，而 Wang 的方案造成的 *PSNR* 下降可达 2dB
- ◇ 实验结果表明，本文方案相对于传统方案
  - v 在错误检测能力上有本质的提升
  - v 可以部分消除传统方案所无法避免的“移位”现象
  - v 本方案的代价很低，图象质量的下降在可以忽略的范围内
- ◇ 对水印参数和系统参数变化时对本文方案性能上的影响进行了测试
- ◇ 对不同参数下方案性能表现的分析再一次验证了在本文所提方案中，错误检测能力和图象质量下降之间确实存在一个折衷关系。

## 第六章 总结

在带宽受限的有误信道（如无线信道）上进行视频传输面临着一些很有挑战性的问题，其中很重要的一点是一方面，压缩后的码流对信道比特误码非常地敏感，而另一方面有误信道由于反射和衰落引入了大量的随机误码和突发误码，影响了码流的正常传输。解决该问题需要一个整体的解决方案，在目前的一种常用整体解决方案中，通常在视频解码端采用错误隐藏技术来改善错误发生时重建图象的质量。但是，错误隐藏技术的效果和效率受错误检测的结果的决定性影响。传统的基于语法检测的错误检测方案尽管简单易行，但是在检测错误的 Q-DCT 系数信息上存在着重大缺陷，而在视频传输中 Q-DCT 系数信息出错的概率又比较大。结果，未被检测到的错误的宏块无法应用错误隐藏技术，造成了糟糕的重建图象，再加上运动补偿技术的采用，帧内的错误将扩散到多帧重建图象中去，整个重建序列的质量将令人无法接受。

本文

◇ 在仔细分析了传统基于语法的方案的不足的基础上，结合对数字水印技术的了解提出了一种基于数字水印的错误检测和定位技术 FEW

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，来提高图象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，选取数字水印方案 FEW，在量化参数为 10，误码率为  $5 \times 10^{-4}$  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

- v 可以将错误检测率提高 61%~117%
- v 错误正确定位率提高 330%~1300%
- v PSNR 只有微弱的下降
- v 方案的复杂度很低

同时，因为本文还提出了该技术的一个开放的整体实现框架，只要替换其中的数字水印嵌入和检测模块，就可以方便地进行基于其他水印方案的研究。

◇ 对于 FEW 方案，给出了对其错误检测能力和所造成的质量下降的理论分析的解析结果。

对错误检测能力的分析是在假设了在每个 Q-DCT 系数上的失真服从加性高斯分布(AGN)的基础上进行的，结果显示

v FEW 方案的错误正确定位率与水印参数  $pos$  之间是一个反比关系

对质量下降的分析是在假设 Q-DCT 系数服从拉普拉斯(Laplacian)分布的基础上进行的，理论分析的结果和实验验证的结果相当的匹配。

本文所得的理论结果，对评价 FEW 水印方案的性能、在一定的系统性能要求下设计水印参数都有实际的意义。

◇ 本文所述的错误检测技术，在提高错误检测能力和降低由于水印嵌入而造成的图象质量下降这两个方案优化目标之间存在着一个重要的折衷(Trade-off)关系。并从理论上得到验证

这个折衷的存在，指示了这类技术在设计和优化上的策略。

◇ 提出本文方法在应用中的实用途径

即实际中的应用由于采用了码率控制技术，可以随着  $QP$  的变化，根据本文的理论分析结果，对应同样的性能要求，水印参数将随着  $QP$  的不同而不同，而这是可以通过计算或者是实验统计得到的。因此，对于本方案在  $QP$  变化的情况下的应用，可以将一定性能要求下，水印参数  $pos$  随  $QP$  的变化做成一张表(Lookup Table)，这样，具体实现的时候只需要查表就可以确定  $pos$  的取值。

◇ 本文所提方案和技术的兼容性体现在，它并不改变编码所得的码流结构因此只要是标准的解码器就可以进行解码工作。这一点，使得本文所提技术，相比于一些用 FEC 来进行检错的技术，具有极大的优势。同时，本文所提的技术和方案不依赖于其他的技术和方案，因此可以单独使用。当然，也可以结合其他误码抵抗技术，以使整个系统能够在误码抵抗和容错上有更好的表现。

本文所提出的技术、理论和实验结果，几乎都可以在文献[34]和[37]中找到。此外，在文献[35]和[36]中，本人还提出了一种类似于 FEW 方案的 FZW(Force Zero

Watermarking)方案并且依照类似的流程和思想,给出了理论分析的结果,当然也给出了仿真实验的结果。

最后可以顺便提一句的是,本文和文献[34]、[35]、[36]和[37]中提及的技术和理论,曾由我的导师何芸副教授在美国 Carnegie Mellon 大学、韩国 KAIST 大学做过邀请报告,在第 22 届图象编码国际会议(PCS2001)上进行论文报告。

参考文献

- [1] ITU-T Recommendation H.261. Video codec for audio-visual services at px64kbit/s. 1993
- [2] ISO/IEC DIS 11172-1. Coding of moving pictures and associated audio for storage media up to 1.5 Mb/s: System. 1991
- [3] ISO/IEC DIS 11172-2. Coding of moving pictures and associated audio for storage media up to 1.5 Mb/s: Video. 1991
- [4] ISO/IEC 13818-1. Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio: System. 1994
- [5] ISO/IEC 13818-2. Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio: Video. 1994
- [6] ITU-T Recommendation H.263. Video coding for low bitrate communication. 1996
- [7] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N3093, MPEG-4 Video Verification Model version 15.0 , Maui: [International Standard] , December 1999
- [8] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 14496-2, Amd X, CODING OF MOVING PICTURES AND AUDIO, Maui: [International Standard], December 1999
- [9] Han Seung Jung, Rin-Chul Kim, Sang-Uk Lee, "A hierarchical synchronization technique based on the EREC for robust transmission of H.263 bit stream", IEEE Transactions on CSVT, Vol. 10, Iss. 3, pp. 433-438, April 2000
- [10] Burlina, P., Alajaji, F., "An error resilient scheme for image transmission over noisy channels with memory", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 7, Iss. 4, pp. 593-600, April 1998
- [11] Wee Sun Lee, Pickering, M.R., Frater, M.R., Arnold, J.F., "A robust codec for transmission of very low bit-rate video over channels with bursty errors", IEEE Transactions on CSVT, Vol. 10, Iss. 8, pp. 1403-1412, Dec. 2000
- [12] Doe-Man Chung; Yao Wang, "Multiple description image coding using signal decomposition and reconstruction based on lapped orthogonal transforms", IEEE Transactions on CSVT, Vol. 9, Iss. 6, pp. 895-908, Sept. 1999
- [13] B. Sklar, "Raleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems, Part I: Characterization", IEEE Commun. Mag., vol. 35, pp. 90-100, Sept. 1997
- [14] Yao Wang, Qin-fang Zhu, "Error Control and Concealment for Video Communication: A Review", Proceeding of The IEEE, Vol 86, NO. 5, pp. 974-997, May 1998
- [15] Wee Sun Lee, Pickering, M.R., Frater, M.R., Arnold, J.F., "Error resilience in video and multiplexing layers for very low bit-rate video coding systems", Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume: 15 9, Dec. 1997
- [16] Raj Talluri, Iole Moccagatta, Yashoda Nag, Gene Cheung, "Error concealment by data partitioning", Signal Processing: Image Communication 14, pp. 505-518, 1999
- [17] Luis Ducla-Soares, Fernando Pereira, "Error resilience and concealment performance for

- MPEG-4 frame-based video coding”, *Signal Processing: Image Communication* 14, pp. 447-472, 1999
- [18] Min-Cheol Hong, Harald Schwab, Lisimachos P. Kondi, Aggelos K. Katsaggelos, “Error concealment algorithms for compressed video”, *Signal Processing: Image Communication* 14, pp. 473-492, 1999
- [19] J.W. Modestino and D.G. Daut, “Combined source channel coding of images”, *IEEE Trans. Communications*, vol. COM-27, pp. 1644-1659, Nov. 1979
- [20] ITU-T Study Group 16. “TMN8 video codec test model near-term version 8”, Q15-B-46. Sunriver; ITU-T, 1997,09
- [21] Van Schyndel, R.G., Tirkel, A.Z., Osborne, C.F., “A digital watermark”, *ICIP-94*, vol. 2, pp. 86-90, 1994
- [22] 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
- [23] F. Hartung and B. Girod, “Digital watermarking of MPEG-2 coded video in bitstream domain”, *IEEE ICASSP’97*, pp. 2621-2624, Acoustics, 1997
- [24] Qiang Cheng, Thomas S. Huang, “Blind digital watermarking for images and videos and performance analysis”, *Multimedia and Expo, 2000. ICME 2000. 2000 IEEE International Conference on*, Volume: 1, pp. 389-392, 2000
- [25] R. B. Wolfgang and E. J. Delp, “A watermark for digital images”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, vol. 3, pp.219-222, 1996
- [26] Jiri Fridrich, “A hybrid watermark for tamper detection in digital images”, *Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications, ISSPA ’99*, pp. 301-304, Brisbane, Australia, 1999
- [27] Deepa Kundur and Dimitrios Hatzinakos, “Digital watermark for telltale tamper proofing and authentication”, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 7, pp. 1167-1180, July 1999
- [28] Chih-Wei Tang, Hsueh-Ming Hang, and Tihao Chiang, “A Proposal for Some Non-Security Watermarking Applications”, *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, MPEG99/N6339*, July 2000
- [29] 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
- [30] 郑君里, 杨为理, 应启珩, “信号与系统 (下册)”, 高等教育出版社, pp.92, 1995.8
- [31] F. Muller, “Distribution shape of two-dimensional DCT coefficients of natural images”, *Electronics Letters*, 15(20), pp. 664-665, September 1979
- [32] F. Bellifemine, A. Capellino, A. Chimienti, R. Picco and R. Ponti, “Statistics analysis of the 2D-DCT coefficients of the differential signal of images”, *Signal Processing: Image Communications*, 4, pp. 477-488, 1992
- [33] Keith A. Birney, Thomas R. Fischer, “On the modeling of DCT and subband image data for compression”, *IEEE transaction on Image Processing*, vol. 4. No. 2, pp. 186-193, Feb. 1995
- [34] Minghua Chen, Yun He and Reginald L. Lagendijk, “Error detection by fragile

- watermarking”, Proceedings of PCS2001, pp. 287-290, Seoul, April, 2001
- [35] Minghua Chen, Yun He, “A watermark based transmission error detection scheme for hybrid decoder”, Journal of Tsinghua University Science and Technology, to appear
- [36] Minghua Chen, Yun He, “Synchronous watermarking scheme for erroneous Q-DCT coefficients detection”, The 2<sup>nd</sup> IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia, submitted
- [37] Minghua Chen, Yun He, “A watermark based transmission error detection scheme”, IEEE Transaction on Multimedia, submitted

## 致谢

自 1994 年进入校以来，我已经在清华渡过了 7 个年头。清华大学浓厚的学习氛围和严谨求实的传统使我获益匪浅。

我很高兴能有机会在一个优秀的教研组里完成我的硕士论文工作。我的导师何芸副教授的严谨的科学态度和不懈的进取精神都是我学习的榜样；她的认真指导和不断督促使我能够顺利完成所有的任务，她在学术上广阔的眼界和知识对我的研究工作有很大的帮助。视频通信研究组里的兰军强和谢乐星同学在方案初期的论证和部分程序的编写上给予了很大的帮助。其他同学在整个研究工作期间给我提出了不少很好的建议和意见，进行了很多次有成效的讨论，让我能够更加深入地思考一些问题、澄清一些问题。感谢视频通信研究组的全体成员以及已经毕业的那些同学，他们都给予我很多各方面的帮助。研究组里宽松活跃的学术气氛令我受益匪浅。在此，对诸位老师同学一并致以最诚挚的感谢。

此外，不能不提到的是荷兰 Delft 大学的 Reginald L. Lagendijk 教授，他对整个研究工作的启发帮助和关注是最终这项技术能够有今天的成果的关键因素之一。正是在与他进行的水印技术和视频通信的讨论启发了我的将数字水印技术运用到视频通信错误检测中去的想法；在进行理论分析和水印设计的时候，他的一些论文和思想有很强的指导作用；与他进行的 E-mail 讨论总是能澄清一些问题，并促使我不断地将研究深入下去。

我还要感谢我亲爱的家人，他们无条件的理解与支持是最有力、最温暖的精神支柱。还有我的好朋友们、舍友们，你们对我的关心和在生活上具体的照顾我一直铭记在心。

最后，对一切关心支持我的同学、朋友们致礼，希望你们能够一道分享我此时此刻的喜悦。

## 附录

## 附录 A

式(4-8)  $MSE_{DCT} = MSE_{Spatial}$  的证明

证明:

$$DCT(f) = f'$$

$$DCT(g) = g'$$

$$DCT \text{ 为线性变换} \Rightarrow DCT(f - g) = f' - g'$$

又  $\because DCT$  为正交变换, 根据帕萨瓦尔定理

$$\therefore \sum_{i=1}^{64} (f(i) - g(i))^2 = \sum_{i=1}^{64} (f'(i) - g'(i))^2$$

$$\text{综上有 } MSE_{Spatial}(f, g) = MSE_{DCT}(f', g')$$