

# 基于 BF609 的数字视频水印系统设计及研究

王特

2014 年 2 月

中图分类号: TP37

UDC 分类号: 621

## 基于 BF609 的数字视频水印系统设计及研究

作者姓名	<u>王 特</u>
学院名称	<u>信息与电子学院</u>
指导教师	<u>薛艳明</u>
答辩委员会主席	<u>李祥明 教授</u>
申请学位	<u>工学硕士</u>
学科专业	<u>信息与通信工程</u>
学位授予单位	<u>北京理工大学</u>
论文答辩日期	<u>2014 年 2 月</u>

# **Research on Digital Video Watermarking System Design**

## **Based on BF609**

Candidate Name: Wang Te  
School or Department: Information and Electronics  
Faculty Mentor: Xue Yan Ming  
Chair, Thesis Committee: Prof. Li Xiang Ming  
Degree Applied: Master of Philosophy  
Major: Information and Communication Engineering  
Degree by: Beijing Institute of Technology  
The Date of Defence: February, 2014

基于BF609的数字视频水印系统设计及研究

北京理工大学

## 研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签    名：                    日期：

## 关于学位论文使用权的说明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签    名：                    日期：

导师签名：                    日期：

## 摘要

随着信息化技术的发展,各种不同形式的多媒体数字作品通过不同的途径快速传播,随之而来的版权问题也越来越突出。作为知识产权保护的重要手段,数字视频水印技术成为信息安全领域的研究热点。

数字视频水印处理的一个突出的难点在于视频数据的数量级较大,特别是有些领域在应用视频水印技术时需要考虑实时性问题。而传统的数字视频水印算法大部分采用软件在计算机上实现水印的嵌入和提取,这种方法实现过程复杂,运算速度慢,很难满足视频水印提取所要求的实时性。因此采用硬件 DSP 平台实现实时数字视频水印算法具有重要的实用价值和意义。本文就数字视频水印算法和 ADSP-BF609 实现技术做了详细的研究,论文的主要工作体现在以下三个方面:

(1) 本文就视频水印算法及系统设计与实现做了大量深入的研究,分析了数字视频水印的相关技术及视频处理原理,阐明了原始域数字视频水印算法,并对小波域数字水印的理论进行了研究。

(2) 提出了一种基于最小可见误差(JND)门限和小波域的自适应视频盲水印算法,该算法利用了小波域多分辨率分析的特点,与 JND 技术相结合,对视频的每帧进行两层小波变换,然后在第二层小波系数 HL2 和 LH2 中自适应的选择嵌入位置,并且根据 JND 门限值选择水印嵌入强度。该算法在保持较好的水印不可见的同时,最大限度地提高了水印的嵌入容量,并实现了水印在 720P 高清视频中的盲检测。随后对嵌入水印后视频进行了几种常见的水印攻击,特别是进行了 H.264 的压缩、帧删除攻击测试。实验结果表明本文算法具有较好的不可见性和鲁棒性。

(3) 基于 ADI 公司的 Blackfin 系列的 BF609 平台,对数字视频水印提取算法进行研究,将小波域的盲检测算法进行 DSP 实现和优化,同时根据高清视频数据量大的特点,充分利用 BF609 的 L1、L2 和 MDMA 的性能,实现了对嵌入水印信息后的 720P 视频的实时提取。

**关键词:** 数字水印; 视频水印; 盲检测; BF609

## Abstract

With the development of information technology, various forms of multimedia digital works quickly spread through different channels, the attendant copyright issues are increasingly prominent. As an important means of intellectual property protection, digital video watermarking technology to become a hot research field of information security.

A prominent difficulty digital video watermarking is greater magnitude of video data, particularly when applied in some areas to be considered real-time video watermarking problem. The traditional digital video watermarking algorithm is mostly software on your computer to achieve watermark embedding and extraction, the complexity of the implementation process of this method, the operation is slow, it is difficult to meet the real-time video watermark extraction requires. Therefore, the use of DSP hardware platform for real-time digital video watermarking algorithm has important practical value and significance. In this paper, digital video watermarking algorithm and ADSP-BF609 to achieve technology to do a detailed study, the main work of this paper is reflected in the following three aspects:

(1) In this paper, mainly do in-depth research on a video watermarking algorithm and system design and implementation, analysis of the relevant principles of digital video processing technology and video watermark, to clarify the original domain digital video watermarking algorithm, and the theory of wavelet domain digital watermarking

(2) Proposed based on the Just Noticeable Difference (JND) threshold and adaptive video blind watermarking algorithm based on wavelet domain, the algorithm uses a wavelet multi-resolution analysis of the characteristics of technology combined with JND, each frame of video layers wavelet transform and adaptive wavelet coefficients in the second layer is selected HL2 and LH2 embedding location and choose according to JND threshold embedding strength. The algorithm while maintaining good watermark invisible to maximize the embedding capacity and to achieve the blind watermark detection in 720P HD video. Then watermarked video on several common watermarking attacks, especially conducted H.264 compression, frame deletion attack test. Experimental results show that the algorithm has good invisibility and robustness.

(3) Based on ADI's Blackfin BF609 series platform for digital video watermarking extraction algorithm to study the blind detection algorithm based on wavelet domain for

DSP implementation and optimization, and high-definition video data according to the characteristics of large, full use BF609 of L1, L2 and performance of MDMA, the realization of 720P video embedded watermark information in real time after the extraction.

**Key Words:** Digital watermarking; video watermarking; blind detection; BF609



# 目录

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 本论文研究的背景和意义	1
1.2 数字视频水印研究现状	2
1.2 本文研究内容及章节安排	3
<b>第 2 章 数字视频水印技术概述</b>	<b>5</b>
2.1 数字水印技术概述	5
2.1.1 数字水印的基本原理	5
2.1.2 数字水印的基本特征	6
2.1.3 数字水印的分类	8
2.1.4 数字水印的应用	9
2.2 数字视频水印技术	11
2.2.1 数字视频水印的特殊性	11
2.2.2 常见的视频水印攻击类型	13
2.3 数字视频水印算法	15
2.3.1 原始域视频水印算法	15
2.3.2 编码域视频水印算法	17
2.3.3 压缩域视频水印算法	18
2.4 本章小结	19
<b>第 3 章 基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法</b>	<b>20</b>
3.1 小波域数字水印技术	20
3.1.1 连续小波变换	20
3.1.2 二维图像的离散小波变换	21
3.2 人类视觉特性及小波域的最小可见误差 JND	23
3.2.1 人类视觉特性	23
3.2.2 最小可见误差 JND	24
3.3 基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法	26
3.3.1 水印嵌入算法	26
3.3.2 水印提取算法	28
3.4 实验结果	28
3.4.1 不可见性测试	29
3.4.2 鲁棒性测试	30
3.4.3 实验结论	32
3.4 本章小结	32
<b>第 4 章 基于 BF609 平台硬件系统设计和盲检测算法实现</b>	<b>33</b>
4.1 系统的总体设计	33
4.2 系统硬件组成	33

---

4.2.1 BF609 处理器.....	33
4.2.2 视频输入与解码模块 .....	35
4.3 盲检测算法实现 .....	38
4.4 算法优化 .....	39
4.4.1 存储器分配与优化 .....	39
4.4.2 编译器优化 .....	41
4.4.3 循环优化 .....	42
4.5 性能测试和分析 .....	43
4.6 本章小结 .....	43
<b>第 5 章 总结和展望.....</b>	<b>45</b>
5.1 论文工作总结 .....	45
5.2 未来研究工作的展望 .....	46
<b>参考文献.....</b>	<b>47</b>
<b>攻读学位期间发表论文与研究成果清单.....</b>	<b>51</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>52</b>

## 第1章 绪论

### 1.1 本论文研究的背景和意义

二十一世纪是一个信息极速发展的时代，世界各地的人们可以更加方便地进行信息交流，并且可以方便的进行多媒体信息的存储和传播，极大的提高了知识传播的效率和准确性。当我们在享受便利的同时，数码产品的安全性也逐渐暴露，如多媒体版权侵犯，非法复制软件或文档，电子商务中数据的非法盗窃和篡改等。可以预见，在未来一段时间内，如何充分利用便利的计算机网络，又可以有效地保护数字多媒体信息的版权安全存储、传输，将成为一个非常重要的研究课题。

传统上应用的信息安全技术有密码技术和数字签名技术<sup>[1-5]</sup>。传统的密码技术是基于信息论和密码学的技术，目前大多数采用加密方法来实现对数字内容的保护，为了使得对传递过程进行非法攻击的攻击者无法从密文获取数据信息，达到版权保护和保证信息安全的目的，首先将对多媒体数据进行加密，转换为密文后再发布。但密码技术也有其不足之处：一方面加密后的文件变得非常复杂，不容易被理解，妨碍了多媒体信息的快速传播；另一方面攻击者都有猎奇心理，会对加密后的多媒体信息产生好奇和注意，进而增加了信息被破解的可能性；此外，当对加密信息进行解密操作后，多媒体数据不再具有加密数据的特性，不再有密码保护屏障，也就无法幸免于盗版。简言之，密码学对于内容一旦解密就会彻底失去了保护作用。

数字签名技术是用“0”、“1”数字信息构成的内容代替手写签名或印章，在法律上具有手写签名或印章相同的作用。它有两种方式：通用签名和仲裁签名。目前，数字签名技术形成了数字签名标准(OSS)，已被用于检验数字信息来源的真实性和可靠性。它对每个消息使用私用密钥进行签名，而采用公共的检测算法来确定被检查消息的内容是否符合与之相应的签名。但这种数字签名因为需要在原始数据中加入大量的签名信息，所以在数字图像、视频或音频中的应用并不方便也难于实际操作。

因此，寻求一种与传统的加密技术和数字签名技术手段的不同，保证信息传输和数字产品的安全性来保护数字产品的版权已成为紧迫的研究课题。信息隐藏技术近年来已经成为国际信息技术领域研究的一个新的研究方向，它作为知识产权保护和隐蔽通信的重要手段，正被广泛的研究和应用。信息隐藏技术研究的内容是，如何将某一

私有信息内容隐藏在另外的公开信息内容中，同时在传输公开信息内容的同时传递隐藏私有信息内容。由于内含隐藏信息内容的多媒体发布是公开的，而非法的检测者很难从公开的多媒体信息内容中判断隐藏私有信息是否存在，更不要说是截获私有信息，这样就达到保证信息安全的目的。

数字水印技术作为信息隐藏技术的一个重要分支，它是一种保护数字产品版权，维护数据安全的有效技术。数字水印技术的原理是将标志信息（水印）通过一定的算法和技术直接嵌入到多媒体数据内容中，但不会影响原数据的价值和使用，而且不能被接收者的感知系统观察或者注意到，只能通过使用专门的水印检测器才能获取这些标志信息。用于嵌入的水印的信息可以是作者的代号、公司名称以及其他有特殊意义的文本等。与传统的加密技术相比，数字水印技术虽不能完全阻止各种盗版行为的发生，但它却可以判断对象是否在受保护的范围内，监视被保护数据的传播过程，对数据进行真伪鉴别、防止非法拷贝，解决数字产品的版权纠纷并提供法庭证据。

数字水印技术在弥补了传统加密、解密技术不能对解密后的数据内容提供更进一步保护的缺陷，弥补了数字签名技术不能在原始数据内容中插入大量隐藏信息的弱点，弥补了数字标签技术容易被完全删除和被修改的不足，弥补了数字指纹技术仅提供版权侵犯者信息的局限。数字水印技术已经引起中外学者和相关领域的浓厚兴趣，并逐渐成为网络信息安全和数字媒体版权保护研究的热点<sup>[6-8]</sup>。

## 1.2 数字视频水印研究现状

1993 年数字水印技术被提出，至今欧洲和美国的部分政府部门、著名大学和知名企业的研究机构，都投入了大量的经费，致力于该项技术的研究，并取得了一定的成绩。其实际应用范围也越来越广，例如：IBM 公司在数字图书馆的版权保护系统中使用了数字水印技术。韩国的三星公司，日本的 NEC 等，还都建立了 DRM 技术开发项目。美国版权保护技术组织为了制定版权保护水印的技术标准，成立了专门的据隐藏小组，他们建立了一个 5C 系统，用于 DVD 的版权保护。此外，数字水印技术已经被写入 JPEG2000 标准中，IBM、Sony、Hitachi、NEC 和 Pioneer 联合制定了一个保护数字视频和数字电影的水印标准协议。2000 年 MPEG-4 正式成为国际标准，该标准可以结合数字水印在内的版权保护技术，提供对知识产权管理和保护。

目前在理论研究方面，对数字水印技术的研究已初步形成体系。从 1996 年第一届举办至今已经有 15 届的信息隐藏界公认的最具权威的学术会议 Information Hiding，

从 2004 年开始改成每年举办一届，发表文章的数量也大幅度增长，该会议主要内容是报道每年的最新研究成果和为信息隐藏提出新的研究方向。在国内，政府对信息安全产业的发展也非常重视。部分数字水印的研究课题得到了国家自然科学基金和“863”计划的资助。

到目前为止，数字水印技术研究主要集中在静态图像水印领域，数字水印产品也主要集中于此领域。随着数字电视和多媒体技术的不断发展，数字视频水印技术的研究将得到越来越多的关注。但是由于视频信号数量级大、本身的复杂性和视频水印的特殊性，提出基于视频信号的水印方案需要解决一些难题：视频数据的数据量较大；视频的视觉失真难以控制；较为复杂的水印技术或算法有较好的效果，但是不能满足视频实时处理的要求，而较为简单的水印技术则通常不能很好地利用空间域和时间域的掩盖效应；此外，存在很多对数字视频水印的攻击，比如对静态图像的水印攻击方法对视频水印也是有效，还有只针对视频的多帧攻击手段，如帧平均、帧删除、帧交换和帧裁剪等<sup>[9]</sup>。

另外，当前的数字视频水印算法研究大多数是基于软件平台的。利用视频压缩标准的测试模型和各种数字视频标准序列进行研究，这样的算法研究方法是非常方便的。但是数字视频水印技术一个非常明显的特征就是实时性要求，而现有的计算机使用的是冯诺依曼结构，要满足实时性是很难实现的。因此对数字视频水印算法的硬件实现技术进行相关的研究工作是非常必要的，同时这方面的研究也具有重要的理论意义和实用价值。

## 1.2 本文研究内容及章节安排

本文就视频水印算法及系统设计与实现做了大量深入的研究，分析了数字视频水印的相关技术及视频处理原理，阐明了原始域数字视频水印算法，并对小波域数字水印的理论进行了研究。提出了一种基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法，该算法利用了小波域多分辨率分析的特点，与 JND 技术相结合，对视频的每帧进行两层小波变换，然后在第二层小波系数 HL2 和 LH2 中自适应的选择嵌入位置，并且根据 JND 门限值选择水印嵌入强度。该算法在保持较好的水印不可见的同时，最大限度地提高了水印的嵌入容量，并实现了水印在 720P 高清视频中的盲检测。随后对嵌入水印后视频进行了几种常见的水印攻击，特别是进行了 H.264 的压缩、帧删除攻击测试。实验结果表明本文算法具有较好的不可见性和鲁棒性。本文还在基于 ADI 公司的

Blackfin 系列的 BF609 平台，将小波域的盲检测算法进行 DSP 实现和优化，同时根据高清视频数据量大的特点，充分利用 BF609 的 L1、L2 和 MDMA 的性能，实现了对嵌入水印信息后的 720P 视频的实时提取。

本文分为五章，结构安排如下：

第一章绪论部分介绍了课题研究的背景和意义，并简要介绍了数字视频水印技术的研究现状和本文的研究概要。

第二章介绍了数字水印的基本原理和特征、数字水印嵌入和提取的基本框架；数字视频水印的特殊性和常见攻击方式与对策；对当先的数字视频水印算法进行了总结，并介绍了典型的数字视频水印算法。

第三章首先介绍了小波变换理论的发展，小波变换的基本原理，，二维离散小波变换等理论知识，然后对人类视觉特性和小波域的最小可见误差 JND 进行了简要的描述。接着提出了一种基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法，该算法利用了小波域多分辨率分析的特点，与 JND 技术相结合，将水印信息嵌入在二层小波系数的中频部分。最后实验结果表明该算法具有较好的不可见性和鲁棒性。

第四章主要是基于 BF609 平台的盲检测算法实现，首先对 BF609 平台的系统总体设计进行了介绍，接着分别对平台中的系统硬件组成进行了详细的分析，将第三章提出的水印提取算法在 BF609 平台上进行实现，然后再根据硬件 DSP 的原理进行了算法优化，最后的实验结果表明，优化后算法能够实时处理高清 720P 的视频。

第六章对本文研究工作进行总结，并对本论文需要完善的工作进行了展望。

## 第 2 章 数字视频水印技术概述

### 2.1 数字水印技术概述

随着信息技术的发展，数字水印技术得以产生并发展成为一门新兴的应用技术，该技术包含多种跨学科理论的交叉运用，涉及到的基本理论和思想包括数学理论、图像处理、密码学等，还可能会用到编码理论、信息论等知识<sup>[10]</sup>。数字水印技术是一种可以有效保护数字产品版权的技术，是一种可以维护数据安全的技术，是信息隐藏技术领域的重要分支。

大部分数字水印技术的基本原理都是利用人类视觉的冗余特性，将水印信息嵌入到图像不敏感的部位中，使得水印信息在图像中不会被人察觉。本章首先介绍了数字水印技术的基本原理，较完整地描述了数字水印技术的一些概念；从多个角度阐述了数字水印技术的不同分类方法和特点；对常用的数字水印算法性能评估方法进行了总结。最后在熟悉了数字水印相关基础知识之后，介绍了几种常用的数字视频水印的经典算法。

#### 2.1.1 数字水印的基本原理

数字水印技术通过在原始数据（如图像、声音、视频）中嵌入特定的、不可见的信息——水印(Watermark)来确认数据拥有者的合法所有权，并可以作为鉴定和起诉非法侵权的证据。被嵌入的特定信息可以是一段随机序列、文字、图像等。水印通常是不可察觉或不可见的，它与原始数据内容结合在一起并隐藏在其中，成为宿主数据的一部分，可以经过一些不破坏嵌入后数据使用价值的攻击而保存下来。

与传统的加密技术相比，数字水印技术虽然不能防止盗版活动，但是它却可以判别目标对象内容是否受到保护，能够对被保护的数据提供真伪鉴别，为非法拷贝和版权纠纷提供可信的法律证据。

一个完整的数字水印系统主要包括三个基本部分：水印生成部分、水印嵌入部分和水印提取或检测部分，它们分别对应了水印生成算法、水印嵌入算法和水印提取检测算法。水印生成算法用于生成合适的、具有高安全性的水印序列。水印嵌入算法是将生成的水印信息嵌入到数字产品中，要求数字水印在嵌入源数字产品后，不能影响到原数字产品的正常使用和合法传播。在一些情况下，需要提取出数字产品中的水印

信息，就要使用相应的水印检测提取算法，对该数字产品进行水印检测和提取操作。如果检测提取算法设计得比较好，经过水印的检测提取算法计算出的水印与嵌入的水印信息的相似度很高，甚至是基本相同<sup>[11-12]</sup>。

水印的嵌入过程和提取过程可用图 2.1 和图 2.2 来表示。

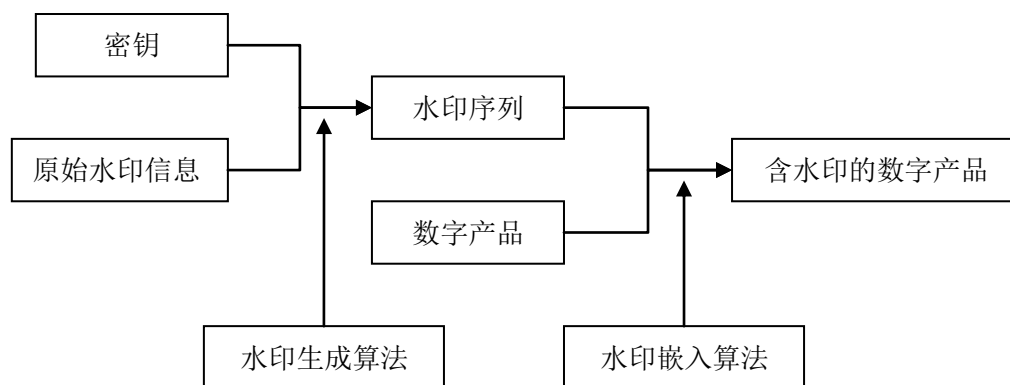


图 2.1 水印嵌入过程

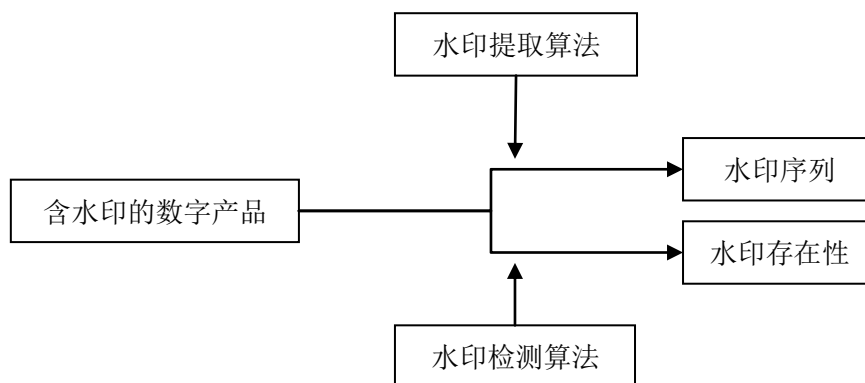


图 2.2 水印检测提取过程

### 2.1.2 数字水印的基本特征

数字水印技术作为信息隐藏技术的一个分支，要求其既能够实现版权保护、真实性完整性认证等目的，还能做到数字水印算法和产品完美融合，在嵌入水印信息后不能使数字产品的质量受到影响，保证了这些条件，带有水印的数字产品才能够进行使用、存储和传输。所以这就对数字水印技术提出了更多的要求，使得数字水印具有与其它信息技术的不同的特性。

#### 1. 不可见性（隐蔽性、透明性）

数字水印的不可见性要求嵌入的水印信号对载体作品的质量几乎没有影响，人眼



无法从感官上判断出包含水印的作品与原作品的不同<sup>[13]</sup>。特别在载体质量非常高的 HDTV 和 DVD 的视频和音频中，要求水印具有更高的不可见性。通常使用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来定量地衡量水印的不可见性。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I(x, y) - I_w(x, y)]^2} \quad (2-1)$$

其中， $I(x, y)$  是原始图像数据， $I_w(x, y)$  是嵌入水印后图像数据， $M, N$  分别是图像的行数和列数。由于峰值信噪比计算复杂度低，在比较时使用的是相对值，而不是绝对值，因此常选用 PSNR 来衡量水印的不可见性。

## 2. 鲁棒性（稳健性、顽健性）

鲁棒性指水印信息的抗攻击能力，即含有水印信息的多媒体数据经过一些常规信号处理或者恶意攻击后，通过某种水印检测或提取方法仍然能够将水印信息检测或提取出来。常见的信号处理有信道噪声干扰、A/D 转换、滤波、编解码、剪切、尺度变化、平移等，这些操作都会对水印信息产生一定的影响。某些应用场合要求水印具有较低的鲁棒性（脆弱性），即数字产品经过任一攻击后都会破坏水印信息，这样便可以通过检测水印信息是否被改变来判断数字产品是否完整。

## 3. 水印信息容量

对于图像而言，水印信息容量指的是一幅图像可以嵌入水印信息的比特数；对于音频而言，水印信息容量指的是单位时间可以在音频数据中嵌入水印的比特数；对于视频而言，水印信息容量指的是每帧视频图像或者单位时间可以嵌入水印信息的比特数。通常我们希望水印信息容量可以尽量大一些<sup>[14]</sup>。数字水印最重要的特性是：鲁棒性、不可见性及信息容量，大多数应用场合都希望这三个特性越大（强）越好，然而它们三者又是互相矛盾的，故我们要根据实际应用需求，合理选择三种特性的折中点，在保证其他特性都达到要求的条件下，有针对性的提高某一特性。

## 4. 安全性

安全性指的是水印在经历任何恶意攻击之后都不容易被篡改，它不同于鲁棒性所针对的普通信号失真。数字水印的安全性要求水印信息必须是安全的，不容易被篡改或伪造，同时在检测提取时有较低的误检测率。水印算法要求能够识别被嵌入到保护对象中的水印信息，并能在检测的时候提取出来。水印信息可以用来判断对象是否正在受到保护，并能够对被保护数据的传播过程进行保护，有效控制非法拷贝的出现。

数字水印的不可见性、鲁棒性和水印信息容量这三方面是很难同时达到最佳情况的，我们需要根据实际应用场合来选择相应的侧重点，在保证其他特性基本满足要求的情况下，有侧重于地满足对某个特性的特定需求。如在隐蔽通信中，最重要的是信息量，对鲁棒性要求不高，这是因为这种通信方式本身就极为隐蔽，不容易遭遇到敌方的篡改攻击。在版权保护中应用数字水印时，不可见性和鲁棒性是关键，而信息容量相对次要一些。

### 2.1.3 数字水印的分类

#### 1. 按水印抗攻击的能力划分

根据数字水印抗攻击能力的强弱，可将数字水印划分为鲁棒性水印、脆弱性水印和半脆弱性水印。其中鲁棒性水印的抗攻击能力最强，它要求在经过了一些常规信号处理或某些恶意攻击破坏之后，我们仍然可以将水印信息检测或提取出来。这种水印一般应用于版权保护等方面。与鲁棒性相反的是脆弱性水印，这种水印的抗攻击能力最弱，它要求水印信息对任何信号处理都是敏感的，即经受过任意一种信号处理以后，水印信息都会遭到破坏。这种水印一般用于完整性保护等，即通过水印信息的状态来判断数字文件是否被处理过。介于上述两种数字水印之间存在一种抗攻击能力居中的半脆弱性水印，它要求水印能够对抗一些常见的信号处理，即在此时表现出鲁棒性，而又对一些恶意攻击敏感，即在此时表现出脆弱性。本文我们主要研究的是抗攻击能力强的鲁棒性水印。

#### 2. 按感知特性划分

按照人的感官是否能够察觉到水印信息的存在，水印被分为不可见水印和可见水印。不可见水印要求人的感官无法识别水印是否嵌入，只有通过专门的检测工具才能将水印检测或提取出来。而可见水印是将具有某种特殊标志的水印信息明确标注在数字产品中，主要应用于防止非法拷贝等方面。本文主要研究的是不可见水印。

#### 3. 按水印所附载的媒体划分

在数字高速发展的大趋势下，各种类型的数字媒体也迅猛的发展起来，于是研究者开始了针对各种不同数字媒体的数字水印的研究。根据所依附的数字媒体的不同，数字水印可以分为视频水印、音频水印、文本水印等。本文我们主要研究的是视频水印。

#### 4. 按水印嵌入的位置划分

根据水印信息的嵌入位置，水印被分为变换域水印和空间域水印。空间域水印指

的是在数字媒体的空间域进行水印信息的嵌入，由于直接在空间域进行水印嵌入及提取，无需进行其他处理，故这种水印计算量少、算法复杂度低、较容易满足实时性要求。但是这种水印很难同时满足不可见性及鲁棒性要求。变换域水印指的是首先将数字媒体信号进行某种变换如离散傅里叶变换（DFT）、离散小波变换（DWT）、离散余弦变换（DCT）等，然后再修改变换域的系数以完成水印信息的嵌入，即在变换域进行水印的嵌入工作。由于要先进行某种复杂的变换之后才进行水印嵌入工作，这种水印计算量大、算法复杂度高。但是不可见性及鲁棒性较好。本文我们主要研究得是基于小波域的水印。

#### 5. 按水印检测手段划分

根据检测或提取水印数据时是否需要原始信息，水印可以分为盲水印、非盲水印和半盲水印。盲水印指的是进行水印数据的检测或提取时不需要原始信息，可在任何拥有检测或提取环境的平台上进行水印信息的检测或提取<sup>[15]</sup>。非盲水印指的是在进行水印数据的检测或提取水印时需要原始信息，通过比较待检测多媒体数据和原始多媒体数据的差别来实现水印数据的检测或提取。半盲水印指的是检测或提取水印数据时不需要原始载体信息，但是需要原始水印信息。其中盲水印是目前应用最广泛同时也是本文研究的一种水印。

#### 6. 按水印内容划分

根据水印信息的内容，水印被分为无意义水印和有意义水印。无意义水印指的是水印信息对于多媒体载体而言是没有意义的，这种水印数据一般是一个随机序列。有意义水印指的是水印信息是有意义的，这种水印数据一般是图像、视频段、音频段等。有意义水印由于受到恶意攻击或其他原因被破损之后，检测者仍然能够直接观察或者通过某种信号处理确认水印是否存在，而我们对无意义水印的检测只能通过统计决策的来实现。本文我们研究的是无意义水印。

### 2.1.4 数字水印的应用

随着数字水印技术的发展，数字水印技术的应用越来越广泛，数字水印技术的主要应用领域<sup>[16]</sup>有：

#### 1. 广播监控

日本在 1997 年爆出了一则关于电视广告的丑闻：有几家电视台收取了广告商的广告费用，但却没有将广告商的广告播出，并且在很长时间内竟然没有被人发现，其中一部分的原因就是因为当时没有出现适当的监控系统来对广告的实际播放情况进

行监控。为了实现广播监控，以往的方法是雇用专门的监控人员监视和监听播出的内容，但这种方法的开销昂贵且容易出现错误。为了使广告商的利益得到保护，并且减少花费和提高监控的准确度，使用数字水印技术可以对识别信息进行编码，利用水印自身嵌入到载体内容中的特点，不需要使用广播信号的特殊片段，因此这种方法完全能够兼容现有的广播基础设备。

## 2. 隐蔽通信

将重要的特殊的数据作为水印隐藏在公开传输的各种原始数据中，与传统的密码术比较而言，它不改变载体数据的特征，不易被人察觉，不易丢失。

## 3. 交易跟踪

如果对于某个数字产品，我们不希望它被滥用，只希望制作有限的拷贝用于销售和传播，那么我们就可以对每一个拷贝嵌入不同的水印，利用水印可以记录作品的某个拷贝所经历的一个或多个交易。当市场上有该数字产品的非法拷贝出现，所有者就可以根据水印追查非法拷贝的来源，便于追究责任。DivX 公司曾做到将水印技术应用到交易跟踪当中。他们在一款 DVD 播放器中，采用了数字水印技术防止磁盘的盗版行为。每个 DivX 播放器都会在其播放的视频中嵌入唯一标识的水印，如果有人录制那段视频并将其出售，那么 DivX 公司就可通过解密水印而跟踪到录制人（或是录制人的 DivX 播放器）。

## 4. 内容真伪的鉴别

如今对数字作品可以进行很容易的篡改而不被察觉，密码学中关于消息真伪鉴别有着比较成熟的研究。最常见的加密方法就是数字签名，即对数据概要进行加密。将经过接收到的数据同原始签名相对照，如果发现签名不符，则说明数据被篡改过。数字签名本身需要作为原数据的一部分，同它们所要验证的数字作品一同发送。然而一旦签名丢失，数字作品将无法进行真伪鉴别。使用数字水印技术将生成的签名信息嵌入到作品中是比较好的解决方案，这种被嵌入的签名也称真伪鉴别水印。即使微小改动也能造成这种水印无法检测，同时根据提取出来的失效水印还可以知道作品是被如何篡改的。

## 5. 所有者识别

文本版权声明在数字作品识别所有者中具有局限性。一方面，在拷贝这些文本时声明部分很容易被无意的去除。另外文本声明部分可能会占据一部分的图像空间，破坏了原有图像的美感，而且还容易被剪切除去。由于内嵌的水印既是不可见，也是同

载体作品不可分离的，故水印技术比文本声明更加适用于使用者识别应用中。当用户使用相应的水印检测器，他们可以很容易地识别该作品的所有者，即使是使用那些能够将文本用户声明去除的方法来对这些作品进行改动，水印信息仍然能够被有效的检测到。

## 6. 所有权验证

除了可以对作品的版权所有者信息进行识别，水印技术还可以对作品进行所有权验证。传统的文本声明很容易被修改和伪造，不能用来解决这个问题，人们同样可以使用水印技术来保护版权。由于攻击者是没有检测器的，所以清除水印本身就会相当困难。然而，即使不能直接清除水印，攻击者也可以采用相应的水印系统对作品嵌入水印，让数字作品里具有攻击者嵌入的水印。所以人们无法通过作品中所拥有的水印信息来直接对版权归属进行证明，只能想办法证明该作品是从另一作品得来的事实。数字水印技术能够间接证明某些有争议的作品更有可能是属于版权所有者而不是攻击者，因为版权所有者拥有未嵌入水印的原始作品。

## 7. 拷贝和设备控制

在防止拷贝控制的应用中，最好能够阻止对受版权保护的内容被非法拷贝，但同时要保证人们能够对作品内容进行欣赏。可以将水印信息嵌入到内容本身中，无法与内容进行分离操作。然后在所有录制设备中都安装相应的水印检测器，当设备在被录制内容中检测到“禁止拷贝”的水印时，设备就会自动启动禁止拷贝操作。

## 2.2 数字视频水印技术

数字视频水印就是加载在数字视频上的数字水印，它利用视频数据中普遍存在的冗余数据和随机性把表征版权的水印信息嵌入到原始视频数据中，从而保护数字视频产品的版权或完整性，确保版权所有者的合法权益。目前，数字视频水印技术除了版权保护之外，还可以应用于视频拷贝控制、广播监控、视频数据取证、数字指纹技术和隐蔽通信中。数字视频水印技术的应用范围正在不断扩展。

### 2.2.1 数字视频水印的特殊性

由于视频序列本身的一些特性，数字视频水印除了具有数字图像水印的特征，同时也具有其自身的特殊性<sup>[17]</sup>。

#### 1. 实时性

数字视频水印算法在大多数情况下要求水印的嵌入和提取是实时完成的,不能因为水印的嵌入和提取过程中的不实时处理而影响视频图像的质量,这也是视频水印与静止图像水印之间的重要区别。实时性是数字水印算法能否应用于视频编码中的关键。为了保证水印嵌入和提取是实时或接近实时的,就有必要要求水印嵌入和提取算法尽量具有低复杂度<sup>[18]</sup>。通常情况下,对静止图像嵌入或提取水印时,几秒或更长的时间都是可以接受的,但是对于视频数据而言,为了确保视频数据的平滑性和合适的帧率,就必须对水印嵌入或提取的延时时间进行严格要求。当然不同应用场合会有不同的延时考虑:比如在数字电视广播中应用数字水印,则要求系统具有很高的实时性,这种情况称为强实时性。相反,如果在广播监听的应用中,水印检测器必须能够实时地检测水印,水印嵌入时则没有太高的实时性要求,这就是弱实时性的情况。

## 2. 可靠性

在视频序列的任何位置,我们都可以对数字视频水印进行检测和提取,并能够很快的完成这些操作,而且检测和提取的结果必须是可靠的,否则就无法提取出正确的水印信息<sup>[19]</sup>。在实际应用过程中,对本来没有嵌入水印的数字产品会错误地检测到水印,而明明已经进行了水印嵌入的视频却没有检测到水印信息<sup>[20]</sup>。我们在设计视频水印检测和提取算法时应该尽可能地把这种错误降到最低。

## 3. 安全性

将水印信息嵌入数字视频产品后也是有不可见性要求的,但不可见并不能说明嵌入的水印信息就是安全的。安全的数字视频水印应该能够承受各种几何攻击<sup>[18]</sup>,即使攻击者知道视频水印的嵌入提取算法,也不能够获取数字视频中的水印信息。解决这个问题可以采用传统的密码技术,在视频水印的嵌入过程中使用密钥,水印的检测提取过程也必须使用密钥才能实现。由于水印密钥本身具有的保密性和难预测性,加之可以使用较大的密钥长度来增强密码强度,这样能有效地保证数字视频水印信息的安全<sup>[21]</sup>,从而保护了数字视频产品的版权。

## 4. 压缩编码

数字视频产品所携带的数据量都是非常巨大的,存在着大量的信息冗余,在存储、传播过程中通常需要采用压缩编码技术对其进行压缩,目前采用的压缩编码标准是 MPEG 系列和 H.264 系列。如果在压缩域中加入水印,需要针对不同的编码方式设计不同的水印嵌入和检测策略。如果在原始视频中嵌入水印,水印信息一般是利用视频的冗余数据来嵌入的,而在视频压缩编码过程中需要去除视频中的冗余数据,因此必

须考虑视频压缩编码标准来设计水印嵌入算法，否则嵌入的水印很可能在编码过程中就被完全丢失。

### 5. 盲检测性

视频数据量大，要保留所有的原始视频用作恢复水印不太符合实际视频系统。并且在某些应用中，并不能获得原始的视频数据信号，即使能够获得原始的宿主信号，由于数据量巨大，系统也无法提供足够的存储空间来存储这些原始数据。这就要求数字视频水印的检测和提取算法具有盲检测的特性。

### 6. 鲁棒性

视频数据可以看成是由一系列的图像帧在时间维上组合而成，因此，视频数据除了受到一些针对图像的攻击外，还存在一些特有的处理和攻击方法。视频水印必须保证具有相应的鲁棒性，即能经得起无意修改或恶意攻击。在保证数据对象的使用价值的前提下，都无法擦除水印信息，并应该能够提取出嵌入的水印。

## 2.2.2 常见的视频水印攻击类型

数字视频水印的攻击方式多种多样，有些研究者对这些攻击方式进行研究后将它们进行了分类。陈明奇等人将数字水印的攻击方式分为4类：稳健性攻击、合法攻击、解释攻击和表达攻击<sup>[22]</sup>。攻击的目的是降低水印检测的能力或破坏隐藏在载体数据中的水印信息的意义。针对视频的各种攻击可以大致分为无意攻击和有意攻击，常见的攻击类型有<sup>[23]</sup>：

### 1. 视频处理攻击

视频使用者为了增加视频数据的可用性、可读性以及便于管理视频媒体文件等，通常会对视频数据进行一些常规的非恶意信号处理操作，这些操作不是以攻击为目的，然而却可能造成水印嵌入与检测或提取的时空不同步，导致水印信息的改变。这些操作包括：视频传输过程中会引入的噪声，视频帧的插入、重组、删除等编辑操作，视频的AD/DA转换处理中视频信号存在的失真，为了视频编辑改变视频数据格式(H.264, MPEG-4, MPEG-2)等。在经过上述这些操作后引起的水印信息的破坏都是无意的。

除了前面我们所说的常规信号处理，对视频水印所进行的操作更多的是恶意攻击，破坏静止图像水印信息的恶意攻击同样也可以破坏视频水印信息，比如噪声攻击、滤波攻击、JPEG压缩攻击、扰乱攻击等。刘春庆等人对破坏图像水印信息的常见攻击方法进行了总结并提出了针对不同攻击的防范措施<sup>[24]</sup>。除此之外，视频水印在经

过针对视频的攻击后也会遭到破坏，比如同步攻击、拷贝攻击和共谋攻击。

## 2. 同步攻击

同步攻击是通过破坏水印信息的同步性来达到破坏水印信息的目的。同步攻击并不会将嵌入在视频数据中的水印信息去除掉，而是将水印检测器和水印信息之间的同步性破坏掉，从而使得检测器无法检测出水印信息。常见的同步攻击方式有帧插入、帧剪切、帧交换等，经过这些操作后，视频产品质量基本不会受到影响，也不会对视频的视觉质量造成损害。要抵抗这种攻击带来的影响，需要不断的提高水印检测器的智能化程度和水印检测提取算法的完善程度。

## 3. 拷贝攻击

拷贝攻击的基本思路是首先通过某种方法从载有水印信息的视频数据中估计出一个水印数据，然后再将这个估计出来的水印数据嵌入到要攻击的视频数据中。攻击过程分为三步：第 1 步，使用非线性降噪、滤波等方法将某一载有水印信息的合法视频中的水印信息去除掉，得到与该合法视频嵌入水印前的原始视频极为近似的近似视频；第 2 步，将合法视频与近似视频相减，得到与水印信息非常相似的近似水印信息；第 3 步，把近似水印信息嵌入到其它要攻击的视频中。解决拷贝攻击的方法是用传统的密码签名技术来防止对水印的拷贝操作。

## 4. 共谋攻击

共谋攻击<sup>[25]</sup>是利用视频序列相邻帧间数据具有很高的相关性，一些具有合法水印数据的用户，通过所掌握的不同水印数据恶意的除去视频序列中的水印信息，得到不含水印数据的视频序列。**Hartung** 等将共谋攻击划分为两种类型<sup>[26]</sup>：（1）在将相同的水印信息嵌入到不同的视频帧中的情况下，攻击者通过线性平均的方法估计出每个水印视频中的水印信号，将合法视频序列减掉水印的估计值，就能得到不含水印的视频序列；（2）在不同的水印信息嵌入到相同或类似的视频数据的情况下，攻击者将水印视频数据取平均值，就可以很容易地去除水印。解决共谋攻击的方法有增加水印容量、筛选合适的水印嵌入位置等。

上面我们提到的各种攻击手段，有的是直接破坏水印信息，有的是破坏水印信息和检测器之间的同步性，它们采用的攻击方式不同，但都能够达到水印信息无法正确检测或提取的目的，使得水印算法失效。故我们设计具体的水印算法时要考虑水印算法抵抗这些攻击的能力。



## 2.3 数字视频水印算法

数字视频在传输过程中，需要将原始视频数据通过编码器压缩成码流，通过中间信道的传输，在接收端利用解码器将接受到的数据码流解码成数字视频数据。针对数字视频的这一特点，我们可以在三个位置嵌入水印信息，衍生出三种不同的数字视频水印嵌入提取方案，三种方案的嵌入提取位置如图 2.3 所示。

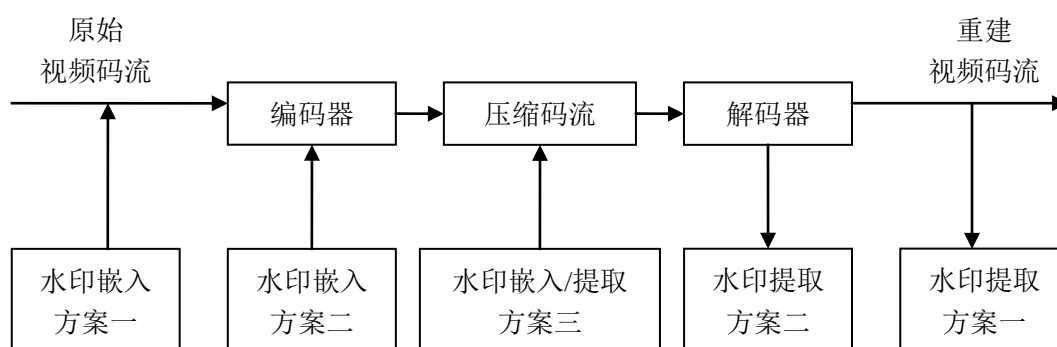


图 2.3 数字视频水印嵌入提取方案

由图 2.3 可以看出，三种方案对应了视频码流的不同类型：原始视频流、视频编码过程和压缩码流。由此视频水印算法也就可以根据不同的嵌入方案划分成为原始域视频的水印算法、编码域的水印算法和压缩域的水印算法，图 2.4 给出了视频水印算法分类的框架图<sup>[27]</sup>。

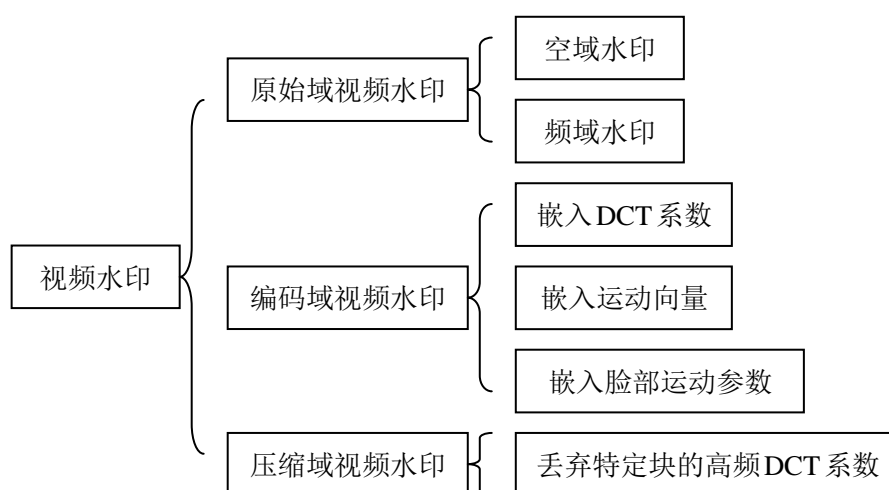


图 2.4 数字视频水印算法的类型

### 2.3.1 原始域视频水印算法

原始域视频水印算法原始域水印算法指的是原始视频数据在经过压缩编码之前已经嵌入了水印信息，然后带水印的视频水印信息再经过编码、信道传输、解码等一

系列操作。在原始域嵌入水印信息与在静止图像中嵌入水印信息有许多相似之处，故可以借鉴相对比较成熟的静止图像的水印技术，如扩频、人类视觉模型、自适应、同步检测等思想。原始数据嵌入水印之后经过压缩编码等操作有可能会使水印信息遭到破坏或丢失。但是这种算法计算复杂度低。根据水印信息是嵌入在原始数据的空间域还是变换域，还可将原始域视频水印分为空间域数字视频水印算法与变换域数字视频水印算法。

### 1. 空域水印算法

空间域数字视频水印算法指的是直接把水印信息嵌入到视频信号的空间域（亮度或者色度分量上）。大部分的空间域数字视频水印算法都是将图像的水印算法直接应用到视频中。以一种易于图像扩频的视频水印算法为例，该算法的基本思想为：把数字视频信号等效成一个一维的信号流，这样便可以将水印信号进行扩展、调制放大操作后产生的一维随机序列嵌入到数字视频信号流中；还有一种常见的空间域数字视频水印算法是将视频数据看成是一帧一帧的静止图像，将水印信息嵌入到每一帧图像上，并且每帧嵌入的水印信息是相同的，嵌入水印信息的强度由局部缩放因子进行控制。比较有代表性的空域水印算法有杨先义等人提出的在原始视频中使用扩频技术嵌入水印的算法<sup>[28]</sup>，刘丽等人提出的空域自适应视频水印算法<sup>[29]</sup>，Mobasserri 等人<sup>[30]</sup>将视频看做时间维度上连续的静止图像，将水印转换成伪随机序列后嵌入视频帧中，Frank Hartung 博士<sup>[31]</sup>提出的空间像素域扩频视频水印算法等。空域水印算法的优点是计算简单，缺点是算法在水印系统的鲁棒性和不可感知性较差，嵌入的水印信息需要进行视频压缩的操作，可能会造成信息丢失。

### 2. 变换域水印算法

变换域数字视频水印算法是在原始视频经过某种变换后将水印信息嵌入到变换域的一种水印算法，该变换可以是 DFT、DCT、DWT 等。在视频的变换域嵌入水印信息的思路有三种：（1）将数字视频等效成三维信号，即空间上的二维，时间上的一维信号，对其进行三维变换之后再进行水印嵌入；（2）将数字视频看成一帧一帧静止的图像在时间上组成的视频数据流，在单帧图像的变换域嵌入水印或利用每帧图像之间的关系嵌入水印信息；（3）把数字视频数据先进行分块操作，然后按块进行变换，之后再进行水印的嵌入工作。变换域水印算法中有代表性的典型算法有李英等人提出的基于三维小波的视频水印算法<sup>[32]</sup>，孙建德等人提出的基于独立特征量的盲视频水印方案<sup>[33]</sup>，Deguillaume 等人提出将扩频水印嵌入到视频序列的三维 DFT 系数<sup>[34]</sup>上，

Swanson 等人使用时域小波变换和频率掩盖特性相结合的方法来嵌入水印信息<sup>[35]</sup>等。由于要进行复杂的变换之后再进行水印信息的嵌入工作，故变换域水印算法计算复杂度高，实时性不容易满足。

### 2.3.2 编码域视频水印算法

目前比较流行的视频压缩的标准主要是 H.26X 系列（包括 H.261、H.262、H.263、H.263+、H.263++、H.264 等）和 MPEG 系列（包括 MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4 和 MPEG-4 AVC 等）两大类。压缩标准的基本原理为：通过运动补偿进行预测或者将视频图像分块之后再进行块编码的方法来实现视频压缩。编码域视频水印算法是在视频数据进行过压缩编码之后再进行水印信息的嵌入。

#### 1. 将水印嵌入 DCT 系数中

此类水印将水印信息嵌入到视频量化 DCT 系数的变化域中，数字图像水印技术在该的算法比较成熟。Chung 等人提出在 MPEG 编码中嵌入水印信息的编码域水印算法<sup>[36]</sup>，在 DCT 编码过程中来实现水印嵌入，该算法是对 I 帧进行处理。通过将需要嵌入的原始水印信息通过调制、扩频来生成扩频水印，并对其进行离散余弦变换，得出  $8 \times 8$  的 DCT 系数块 W；对视频流中的 I 帧进行大小为  $8 \times 8$  的块 DCT 变换，对系数块进行处理，并根据视频内容自适应计算出水印嵌入的强度。根据计算出的嵌入强度，将 DCT 系数块与对应的水印位相加，得到内含水印信息的 DCT 系数块，最后量化和熵编码之后，就得到了含有水印的视频压缩码流。

Koch 视频水印算法<sup>[37]</sup>的处理流程是首先对视频帧进行  $8 \times 8$  分块，然后对得到的每个小分块进行 DCT 变换，再参照 DCT 系数量化表对系数进行量化，然后从分块中选出两个分块，如果嵌入的水印信号为“1”，则调整中频系数的值，使第二块的中频系数值全都小于第一块的中频系数值；若水印信号为“0”，则调整中频系数的值，使第二块的中频系数值满足全都大于第一块的中频系数值。周国志等人提出了一种水印嵌入的控制策略<sup>[38]</sup>，来解决视频水印系统中出现的快效应问题。

总结上述算法的优点有：（1）算法借鉴了数字图像的水印算法，这类算法比较稳健和成熟，算法最大限度地考虑了数字视频流的编码结构并尽可能保证视频水印处理的实时性要求。（2）这些算法将水印信息嵌入到原始视频流的变换域系数上，所以不会增加视频流的数据大小，故可以很方便的设计出抵抗各种攻击手段的鲁棒性水印方案。

#### 2. 将水印嵌入运动向量中

运动向量定义为宏块运动位移信息的绝对值，视频格式的不同，会引起该值的不断变化。正是这种变化可以让我们通过修改运动向量的值来嵌入水印信息到视频流数据中。郑振东等人<sup>[39]</sup>提出了一种利用运动矢量的区域特性来嵌入水印信息的视频水印方案，该算主要针对使用 H.264 编码的视频，在视频编码过程中，将搜索区域人为地划分为两个部分。水印信息的嵌入方法为：如果要在某个宏块的运动向量中嵌入水印信息“1”，则搜索第一部分的区域，如果要在某个宏块的运动向量中嵌入水印信息“0”，则搜索第二部分的区域，按照这种方法逐步的将全部水印信息嵌入到视频流的 P 帧中。本算法的优点在于简单实用；能有效的降低 H.264 编码中关于运动估计部分的运算复杂度；可以利用的运动矢量资源丰富，水印容量大；嵌入水印后的视频画面质量好。缺点则是不能有效的抵抗各种攻击手段，算法的鲁棒性能不强。

### 3. 将水印嵌入脸部运动参数中

这种算法的基本思想是利用通信系统中的扩频思想对水印信号进行调制，然后将扩频水印信号嵌入到筛选出的视频脸部运动参数（FAP）块中。该方案主要用于 MPEG-4 视频媒体中。Hartung 等人在 1989 年提出的算法<sup>[40]</sup>核心思想是将 1bit 的水印信息分散嵌入到多个 FAP 中。提取水印时需要先减去原来的 FAP，再使用与嵌入水印时相同的随机序列进行计算，最后判断是否大于给定的阈值。将水印嵌入到 FAP 中的优点有：这种方法不需要经过解码和再编码的处理过程，对原始视频的视觉质量影响较小；水印的计算复杂度较低。本算法的缺点为：水印的嵌入和提取过程需要考虑较为复杂的人类视觉模型；水印提取速率也是很不平衡。

### 2.3.3 压缩域视频水印算法

压缩域的视频水印算法是将水印信息嵌入到视频的压缩域系数中。把水印信息嵌入到视频压缩码流中的优点是不需要对视频数据流进行完全解码和再编码，提高了水印嵌入和提取操作的效率；缺点是嵌入的水印数据量会受到压缩比特率的限制，嵌入的水印强度受视频解码过程中存在的误差的约束，嵌入后视频质量会受到影响。

荷兰代尔夫特工业大学的 Langelaar 等人<sup>[41]</sup>提出了基于压缩视频码流的差分能量水印(DEW)算法，本算法的主要目的是为对多媒体产品的版权进行保护。该算法在设计之处是为静态图像水印服务的，后来逐渐被应用到 MPEG 视频数据流中的 I 帧。

这个方案的主要思想是有选择性的丢弃压缩数据流中特定块的高频 DCT 系数，根据高频 DCT 系数的不同来达到嵌入水印信息的目的。具体实现过程首先会将视频帧按 8×8 大小的分块进行伪随机置乱处理，这个过程中会生成算法的密钥并去除相邻

分块的相关性。本算法通过引入上、下两半部分的高频 DCT 系数的能量差来到达嵌入水印信息到这些像素块中的目的。算法选择高频 DCT 系数的能量差来完成水印嵌入，是因为在压缩码流中可以很容易的计算出能量差，并对其进行调整，并且人眼对高频系数的变化并不敏感。

由于算法的思想是通过丢弃一部分高频系数来嵌入水印信息，所以含有水印的视频码流总比原始的视频码流要小，并且不会出现诸如同步关系被破坏或缓存溢出等问题。算法对 I 帧中所有  $8 \times 8$  的图像块随机置乱的目的在于这样处理后的对比区域中的平滑块和纹理块的数量近似相等，DCT 高频系数在所有区域中的分布比较均匀。与没有随机置乱的情况相比，截断点取值很大或很小的概率也要小很多。随机置乱图像块的另一优点是：水印信息分布到整个图像当中，增加了攻击者破坏水印信息的难度。

在对水印信息进行检测时，检测器计算对应块序列的能量差，再由能量差的符号来决定嵌入位的数值。这一算法可以通过调整区域块的数量或者截断索引的值来增加水印的鲁棒性，但这会是造成嵌入容量的减小和视频图像质量的下降。实验表明该算法能够有效的抵抗视频有损压缩过程和加性高斯噪声等攻击，但对于一些几何攻击（旋转、尺度变换、扭曲等）的鲁棒性较差。

压缩域的视频水印算法设计受到相应视频压缩算法以及视频流编码标准的限制，例如对恒定码率进行约束，因此在算法在方案设计上存在一定的难度。压缩域视频水印算法的总体要求是：嵌入的水印信息不能影响后续视频码流的正常解码和准确显示；完成水印嵌入的视频码流必须满足原始视频码流关于码率约束条件；内嵌的水印信息在满足视觉不可见性的同时，必须能够有效的抵抗有损压缩编码。

## 2.4 本章小结

本章介绍了数字水印的基本原理、基本特征以及数字水印的分类和应用，在此基础上讨论了数字视频水印技术的特殊性、数字视频水印常见攻击方式和对策，详细的介绍分析了典型的数字视频水印算法，即原始域算法、编码域算法和压缩域算法，并比较了它们的优点和缺点。

## 第 3 章 基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法

### 3.1 小波域数字水印技术

小波变换是继一百多年前的傅里叶分析之后的又一重大突破，它是一种崭新的信号分析理论，也是一种新的时频域局部化方法，具有许多其他时频域分析理论所不具备的优良特性。在新的图像压缩标准 JPEG2000 中，主要应用的就是小波技术。小波域图像水印技术具有其他水印算法所没有的优点，比如：一是可以保证水印经过 JPEG2000、MPEG-2、H.264 等有损压缩后不会被去除；二是可以将水印技术与图像编码研究中关于视觉特性的研究成果相结合；三是可以利用小波的多分辨率分析与 HVS 特性一致的特点，来有效地选择适当的水印嵌入位置和比较合适的嵌入强度来增大水印的不可见性和鲁棒性。

#### 3.1.1 连续小波变换

连续（或积分）小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)的基本思想是将信号展开成一族基函数的加权和。即用一族函数来表示或逼近信号或函数。这一族函数是通过基本函数的平移和伸缩构成的<sup>[42]</sup>。

小波函数定义为：设  $L^2(R)$  表示平方可积线性空间， $\psi(t) \in L^2(R)$ ，其傅里叶变换  $\Psi(\omega)$  满足条件

$$\int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (3-1)$$

则称  $\psi(t)$  为一个基本小波或母小波，并称式(3-1)为小波函数的允许条件。

根据式(3-1)可知  $\Psi(\omega)|_{\omega=0} = 0$ ，即  $\psi(t)$  的直流成分为零。根据小波函数的定义，小波函数不仅要求具有一定的震荡性，即它包含某种频率特性，而且还要求具有一定的局部性，即在一个区间上恒等于 0 或者很快地收敛于 0。

将小波母函数  $\psi(t)$  进行伸缩和平移后，并记平移伸缩后的函数为  $\Psi_{a,b}(t)$ ，可以得到如下等式：

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R \quad (3-2)$$

称  $\Psi_{a,b}(t)$  是参数  $a, b$  的小波基函数。其中,  $a$  为伸缩因子 (或尺度因子),  $b$  为平移因子。变量  $a$  反映函数的尺度 (或宽度), 变量  $b$  检测小波函数在  $t$  轴上的偏移位置。由于尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  的取值都是连续变化的, 故又称其为连续小波基函数。

将  $L^2(R)$  空间的任一函数  $f(t)$  在小波基下展开, 就称为函数  $f(t)$  的连续小波变换<sup>[43]</sup>, 表示为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, a > 0 \quad (3-3)$$

其中,  $\psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right)$  是  $\psi \left( \frac{t-b}{a} \right)$  的复共轭,  $a, b, t$  均为连续变量。

由式(3-3)定义的连续小波变换具有如下的反演公式 (重构公式或逆小波变换):

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \bullet \psi_{a,b}(t) db da \quad (3-4)$$

其中,  $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega$ ,  $\Psi_{a,b}(t)$  由(3-2)表示,  $a, b \in R$  且  $a \neq 0$ 。

由上述连续小波的定义不难发现, 连续小波变换有下列的重要性质<sup>[43]</sup>:

- (1) 线性: 多个分量信号和的小波变换等于各个分量的小波变换之和。
- (2) 平移不变性: 若  $f(t)$  的小波变换为  $W_f(a, b)$ , 则发生时移后的函数  $f(t-t_1)$  的小波变换为  $W_f(a, b-t_1)$ 。
- (3) 伸缩性: 若  $f(t)$  的小波变换为  $W_f(a, b)$ , 则发生伸缩后的函数  $f(mt)$  的小波变换为  $\frac{1}{\sqrt{m}} W_f(ma, mb)$ 。

### 3.1.2 二维图像的离散小波变换

20 世纪八十年代, Mallat 首先提出了多分辨率分析的小波概念, 将此之前的所有的正交小波基的构造方法统一起来, 并给出了将信号分解为不同的频率通道以及相应重构算法。Mallat 在小波分析中巧妙地引入了计算机视觉研究中的多分辨率思想, 统一了之前各种小波基的构造方法。并给出了一种小波变换的滤波器组实现方法——Mallat 算法。Mallat 算法的主要思想是将原始函数分解为不同尺度下的“像”和对该“像”的细节描述补充。Mallat 算法是一种应用于离散小波变换的算法, 它比计算完整内积的方法更为有效。它首先计算小尺度下的系数, 然后使用迭代的方式和双子带

编码的方法自底向上的建立小波变换。

Mallat 算法同样可以应用到二维的情况，设图像信号为  $f(x, y) \in V_j^2$ ，则二维逼近图像  $A_j f(x, y)$  可以分解为：

$$A_j f = A_{j+1} f + D^1_{j+1} f + D^2_{j+1} f + D^3_{j+1} f \quad (3-5)$$

式中，

$$A_{j+1} f = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_{j+1}(m, n) \phi_{j+1}(m, n) \quad (3-6)$$

$$D^i_{j+1} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} D_{j+1}(m, n) \psi^i_{j+1}(m, n), i = 1, 2, 3 \quad (3-7)$$

并且

$$C_{j+1}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h(k-2m)h(l-2n)C_j(k, l) \quad (3-8)$$

$$\begin{cases} D^1_{j+1}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h(k-2m)h(l-2n)C_j(k, l) \\ D^2_{j+1}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} g(k-2m)h(l-2n)C_j(k, l) \\ D^3_{j+1}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} g(k-2m)g(l-2n)C_j(k, l) \end{cases} \quad (3-9)$$

令  $H_r$  和  $H_c$  代表对阵列  $\{C_{k,l}\}, (k, l) \in z^2$  的行和列作用的算子  $H$ ，而  $G_r$  和  $G_c$  分别表示算子  $G$  作用于阵列的行和列，这样二维的 Mallat 分解算法即可表示为：

$$\begin{cases} C_{j+1} = H_r H_c C_j \\ D^1_{j+1} = H_r G_c C_j \\ D^2_{j+1} = G_r H_c C_j \\ D^3_{j+1} = G_r G_c C_j \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, \dots, J \quad (3-10)$$

相应的，还可以写出二维 Mallat 重构算法：

$$C_j = H_r^* H_c^* C_{j+1} + H_r^* G_c^* D^1_{j+1} + G_r^* H_c^* D^2_{j+1} + G_r^* G_c^* D^3_{j+1} \quad (3-11)$$

这样，经过二维分解算法，图像被分解为多个频带，以两层小波分解为例，经过分解后，得到七个频带的系数  $LL_2, LH_2, HL_2, HH_2, LH_1, HL_1, HH_1$ 。分别属于低频，第二层中频，第二层高频，第一层中频，第一层高频。图 3.1 显示了二维图像经



过两级小波变换后的各层小波系数的分布情况。

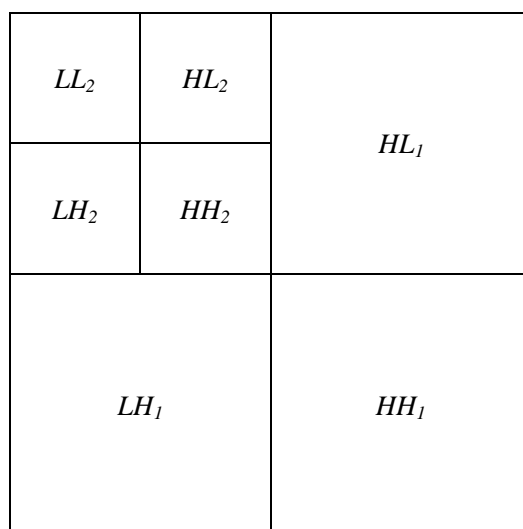


图 3.1 图像的两级小波分解

## 3.2 人类视觉特性及小波域的最小可见误差 JND

### 3.2.1 人类视觉特性

人眼视觉模型(Human Vision Model)是根据人眼的视觉特性而建立的数学模型,将其应用在数字水印中可以有两个作用:第一,可以根据 HVS 特性选择水印嵌入位置,自适应计算出水印强度;第二,可以根据 HVS 特性来评价嵌入水印后的图像不可见性和质量,基于 HVS 特性的图像评估方法来可以代替一些常用的图像评估方法,如均方差法(MSE)。

人类视觉特性的基本特性如下:

#### 1. 灵敏度

灵敏度是指人眼对于直接刺激的反应程度。最主要的刺激是亮度和频率,其次是方位和色彩。人类视觉系统主要存在的频率响应有空间频率响应、谱频率响应、时间频率响应。

空间频率会被人感知为图案或纹理。空间频率响应描述人眼对亮度对比度变化的灵敏度,它是空间频率的函数,即对比度灵敏度函数。实验表明,人眼对中频范围内的亮度变化最敏感,而在较低或较高的频率处灵敏度会下降。实验还表明,人眼对于图像的敏感程度不仅只依赖于图像的频率,也跟方位有关。同时人眼对 45 度的边缘和线最不敏感,对图像中垂直和水平的边缘和线最敏感。

谱频率被人感知为色彩。实验表明,人眼对蓝色分量的敏感度比红色和绿色通道低。

时间频率被人感知成闪烁或运动。实验表明,当时间频率超过 30Hz 时,人眼对图像的灵敏度快速地下降。

## 2. 对比度掩盖

对比度掩盖是指在不同强度图像背景下噪声被不同程度掩盖的现象。例如在小波变换域中,小波系数较大则可以容忍较大的改变,这是因为较大的小波系数就是一个较强的背景,强背景信号掩盖了噪声引起的失真。对比度掩盖根据位置可分为自对比度掩盖和邻域掩盖。自对比度掩盖是指失真信号和掩盖信号的空间频率、位置或方向相同时产生的掩盖,例如,改变了某个小波系数的失真信号所产生的掩盖就是自对比度掩盖;邻域掩盖是指图像复杂区域比光滑区域可以容忍更大的失真。此外,图像的边缘和边缘的位置信息对视觉也很重要。人眼很容易察觉到图像边缘位置的变化,但是对于边缘的亮度变化却不敏感。人眼的边缘掩盖是局部效应,仅影响图像边缘相邻的像素,人眼对这些相邻的像素不敏感,所以在该区域,灰度可以进行较大的改变而不影响图像的视觉效果。纹理掩盖现象是指人眼对纹理区域的噪声敏感度较低,图像纹理越复杂,可被感受的噪声门限值越高。

## 3. 噪声掩盖与相似掩盖

图像中的非规则区域和亮度剧烈变化的区域都可以掩盖其它信号,这种现象称为噪声掩盖。噪声掩盖涉及到对图像的理解与诠释,因此难以被建模。Watson<sup>[44]</sup> 定义了“熵掩盖”的概念,对噪声掩盖现象进行了描述。熵是对信息的一种度量,一个区域的噪声越大,则熵也越大。当观察者知道了一个图像,经过许多次的观看训练后,他对图像认知的熵会减少,并且图像的掩盖能力也减少。在特定的条件下,掩盖现象甚至完全消失。

相似掩盖是另外一种掩盖现象。它说明了人眼视觉系统对于背景明显不同的信号敏感度更高。

### 3.2.2 最小可见误差 JND

对于图像来说,JND(Just Noticeable Difference)也叫最小可见误差,它表示的是人眼不能察觉的最大的图像失真,JND 反映了人类视觉系统对图像的频率、对比度掩盖、亮度敏感性的察觉程度。在图像数字水印技术中,它可以用作在原始图像中加入的水印信号强度的依据。JND 是人类视觉系统的特性对图像各部分能嵌入水印信号强度的

门限。JND 模型是人类视觉特性条件和图像本身特性的基本视觉模型，可用来确定嵌入每个系数的水印信号的强度，所以通过对 JND 技术的运用，能使嵌入水印方法可以最大程度地避免破坏图像的视觉质量，提高嵌入水印信息的不可见性。

在小波域内，对于人类视觉系统需要计算图像的频率敏感性、纹理掩盖和亮度敏感性等因素对 JND 的影响。由于在不同频带中，人眼对噪声的敏感程度不同，而且人眼对在同一频带的不同方向噪声的敏感度也不一样，所以在计算频率敏感度时，必须考虑频带、方向等对人类视觉系统的影响。如果假设原始图像为  $I_{M \times N}$ ，其中  $M$  和  $N$  为原始图像的高度和宽度。对原始图像进行 3 层离散小波变换，可得到 10 个不同小波子带的小波系数块。设  $JND_l^\theta$  为原始图像的 JND 视觉掩盖特性值，其中  $l$  表示小波的分解层数， $\theta=1, 2, 3$  分别表示水平、垂直和对角方向分量。可得：

$$JND_l^\theta(i, j) = f(l, \theta)M(l, i, j)N(l, i, j) \quad (3-12)$$

其中，

$$f(l, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2} & \text{if } \theta = \text{HH} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \times \begin{cases} 1.00 & l = 0 \\ 0.32 & l = 1 \\ 0.16 & l = 2 \\ 0.10 & l = 3 \end{cases} \quad (3-13)$$

表示人类视觉系统对图像的频率敏感度；

$$M(l, i, j) = \frac{1}{256} I_3^{LL} \left( 1 + \frac{i}{2^{3-l}}, 1 + \frac{j}{2^{3-l}} \right) \quad (3-14)$$

表示人类视觉系统对亮度的敏感度；

$$N(l, i, j) = \sum_{k=1}^{3-l} \frac{1}{16^k} \sum_{\theta \in \{LH, HL, HH\}} \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \left[ I_{k+l}^\theta \left( y + \frac{i}{2^k}, x + \frac{j}{2^k} \right) \right]^2 + \frac{1}{16^{3-l}} \text{var} \left\{ I_3^{LL} \left( 1 + y + \frac{i}{2^{3-l}}, 1 + x + \frac{j}{2^{3-l}} \right), x=0,1; y=0,1 \right\} \quad (3-15)$$

表示像素点所在区域的纹理复杂度。

小波变换的多分辨率分解具有较好的空间方向性，可以和人类视觉特性相结合，对每一个小波系数  $I_l^\theta(i, j)$  可以计算出人眼较精确的最小可见误差  $JND_l^\theta(i, j)$ ，它表示小波系数可容忍的视觉失真大小。最小可见误差综合了人类视觉系统不同频率、不同亮度的对比度掩盖效应以及不同方向的敏感性，可以作为为嵌入水印的位置和水印强度

的依据。

### 3.3 基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法

#### 3.3.1 水印嵌入算法

嵌入视频水印前, 需要先将压缩的视频文件转换成原始的 YUV 视频文件, 然后在 YUV 文件中视频中的逐帧进行水印嵌入。视频的每帧都构成一个二维图像, 即分别对每个二维图像进行水印嵌入。

图像经过小波变换后, 主要的能量都集中在低频部分, 因此在低频部分中嵌入水印, 可以较好地保证水印的鲁棒性, 但是低频部分是图像的平滑部分, 人眼对这部分失真比较敏感, 在这部分嵌入水印容易引起图像失真, 影响水印的不可见性; 对角子带是图像的高频部分, 主要包含图像的纹理和边缘信息, 大系数表示图像在该区域有较强的纹理和边缘, 人眼对该部分信息的变化不敏感, 在该部分嵌入水印, 水印具有较好的不可见性, 但水印容易遭到破坏。为了在水印鲁棒性和不可见性之间寻找一个平衡方案, 本文算法对原始图像进行二层小波分解, 将水印嵌入在第二层小波系数的垂直子带和水平子带的块能量较大的系数中。

水印定位是盲水印技术中一项非常关键的技术。为了准确检测水印, 嵌入点位置要能够更准确定位, 即嵌入点的位置一定要稳定。这就要求特征点应具有对抗噪声、抗图像处理及抗几何变形等特点。本文采用的第二级分解水平子带和垂直子带的块能量较大点作为嵌入位置, 但面对一些噪声、图像处理、图像压缩等的影响, 这些系数变化比较大, 可能对能量块的排序造成影响, 从而使水印漏检率较高。为了解决能量块排序可能造成的影响, 本文提出了采用图像均匀分块的方法, 假设嵌入的水印长度为  $m \times n$ , 则将第二级小波变换的水平和垂直子带都划分为  $m \times n$  个区域, 从而每个均匀分块中嵌入一位水印信息。采用图像均匀分块方法改进后, 当单个块中的水印定位失败时, 不影响全局的水印排序, 从而提高了水印的鲁棒性, 同时通过图像均匀分块后, 嵌入的水印分布较均匀, 防止嵌入的特征点在可能在图像部分区域集中的特点, 从而提高了水印的不可见性。

视频序列中的 Y 分量为视频的亮度信息, U、V 分量为视频的色差信息, 并且 Y 分量包含了原始视频中大部分的信息。因此, 本文提出的算法是将水印序列嵌入到原始视频 YUV 格式的 Y 分量中。假设原始视频分辨率为  $M \times N$ , 则其 Y 分量构成  $M \times N$  的灰度图像 I, 数字水印序列 W 的长度为  $m \times n$ 。水印嵌入过程描述如下:

(1) 小波变换：选用 Haar 小波基，对分块图像做二层二维离散小波变换，得到每个小块在不同分辨率下的小波系数。

(2) 均匀分块：将第二层小波系数中的 HL2 和 LH2 均匀分成  $m \times n$  块。

(3) 自适应取特征点：对 HL2 和 LH2 均匀分块采用  $2 \times 2$  的块进行能量计算，为了使能量块算法能够在 DSP 中实时处理， $2 \times 2$  能量块的计算方法如下：

$$E_{2 \times 2} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |C(i, j)| \quad (3-16)$$

每个 HL2 和 LH2 均匀分块中取出  $2 \times 2$  能量最大的分块，比较 HL2 和 LH2 分块中最大能量块的大小，取其中较大的作为水印嵌入的特征块。如果特征块在 HL2 中，则取特征块的行中较小的点作为特征点，如果特征块在 LH2 中，则取特征块的列中较小的点作为特征点。

(4) 计算 JND：根据步骤 (3) 得出的特征点，然后依据公式 (3-12) ~ (3-15) 计算该特征点的 JND 的值。

(5) 自适应强度计算：根据步骤 (4) 中计算出的 JND 的值采用下面方法计算自适应的嵌入强度：

$$S_n = a * JND \quad (3-17)$$

其中  $a$  为嵌入强度系数， $S_n$  为自适应嵌入强度。

(6) 小波系数修改：根据步骤 (3) 中的特征点和步骤 (5) 中计算出的自适应嵌入强度对小波系数进行修改，修改方法如下：

如果特征块处于 HL2 中时，则取特征块的第一行的绝对和为  $S_1$ ，第二行的绝对和为  $S_2$ ；如果特征块处于 LH2 中时，则取特征块的第一列绝对和为  $S_1$ ，第二列绝对和为  $S_2$ 。

嵌入 1 时需满足  $S_1 > S_2$ ，嵌入 0 时需满足  $S_1 < S_2$ 。同时修改系数的方向应该使特征块的特征更加突出，即修改系数后应该使  $2 \times 2$  能量块能量增大，故嵌入 1 时应该增大  $S_1$ ，嵌入 0 时应该增大  $S_2$ 。根据步骤 (3) 得出的特征点和步骤 (5) 得出自适应嵌入强度可以得到修改后的系数  $S'$  为：

$$S' = S_{1,2} + S_n \quad (3-18)$$

(7) 逆小波变换重构：将修改 HL2 和 LH2 系数后的图像进行逆小波变换组合成一帧画面的 Y 分量。至此，我们就完成了在一帧图像中嵌入水印信息。

(8) 重复步骤 (1) ~ (7)，直到所有的视频序列的帧都完成了水印嵌入。

### 3.3.2 水印提取算法

由于视频数据量大，在视频文件进行水印检测操作时，一般无法获得原始的视频数据，并且存储原始视频数据也几乎是不可能的，所以必须采用盲检测的水印提取方法<sup>[45]</sup>。本文根据水印嵌入方案，提出了与之相匹配的水印检测提取方案，水印检测提取过程与水印嵌入过程相类似，首先提取视频序列中的 Y 分量，其 Y 分量构成  $M \times N$  的灰度图像  $I$ ，数字水印序列  $W$  的长度为  $m \times n$ 。提取过程描述如下：

(1) 小波变换：选用 Haar 小波基，对分块图像做二层二维离散小波变换，得到每个小块在不同分辨率下的小波系数。

(2) 均匀分块：将第二层小波系数中的 HL2 和 LH2 均匀分成  $m \times n$  块。

(3) 自适应取特征块：对 HL2 和 LH2 均匀分块采用  $2 \times 2$  的块进行能量计算，计算方法如公式 (3-16)，每个 HL2 和 LH2 均匀分块中取出  $2 \times 2$  能量最大的分块，比较 HL2 和 LH2 分块中最大能量块的大小，取其中较大的作为水印提取的特征块。

(4) 从特征块中提取水印：根据步骤 (3) 中取得水印提取的特征块，如果特征块处于 HL2 中时，则取特征块的第一行的绝对和为  $S_1$ ，第二行的绝对和为  $S_2$ ；如果特征块处于 LH2 中时，则取特征块的第一列绝对和为  $S_1$ ，第二列绝对和为  $S_2$ 。当  $S_1 > S_2$  时，提取水印为“1”，当  $S_1 < S_2$  时，提取的水印为“0”。

(5) 对待检测的视频序列的每一帧进行上述的水印提取操作，我们可以得到一组水印信息组  $W_d(j)$  ( $j$  表示视频序列的帧号)，最后将水印信息组  $W_d(j)$  进行综合，得到嵌入该视频段的水印信息  $W_I$ 。

(6) 将提取得到的水印序列  $W_I$  和嵌入的水印序列  $W_0$  进行相关性计算，如果两者计算的相关值大于一定的阈值，则就可以认定待测视频片段中嵌入了水印信息，反之，则待测视频片段中不还有水印信息。

## 3.4 实验结果

为了验证数字视频水印算法的性能，本文选取一个尺寸为  $1280 \times 720$  的 YUV 高清视频文件 `ducks.yuv` 作为测试视频文件，该文件共包含 100 帧。对测试文件进行水印嵌入和提取操作，根据得到的实验结果分析算法的性能。

### 3.4.1 不可见性测试

为了评测水印嵌入后的视频质量，当前采用的方法主要是主观感官评价和数学定量计算。主观感官评价方法让观测者对视频质量进行主观评价，并根据视频质量等级评判标准进行打分，最后按加权平均法综合得到最终的视频图像质量评价<sup>[46]</sup>，但在实际的研究工作中，不可见性的度量主要还是采用数学上的定量计算方法。常用的客观定量计算量<sup>[47]</sup>是峰值信噪比（PSNR）。如果 PSNR 的值不小于 35dB，那么人眼就无法分辨出视频质量的改变，也就说明了该视频水印算法具有良好的不可见性。

不可见性测试过程如下：

- （1）生成  $8 \times 8$  的 64 位的随机水印序列。
- （2）按照视频水印嵌入算法将步骤（1）中生成的水印序列嵌入到测试视频文件图像帧的 Y 分量中，直到测试文件的每帧图像都完成了水印嵌入的操作。

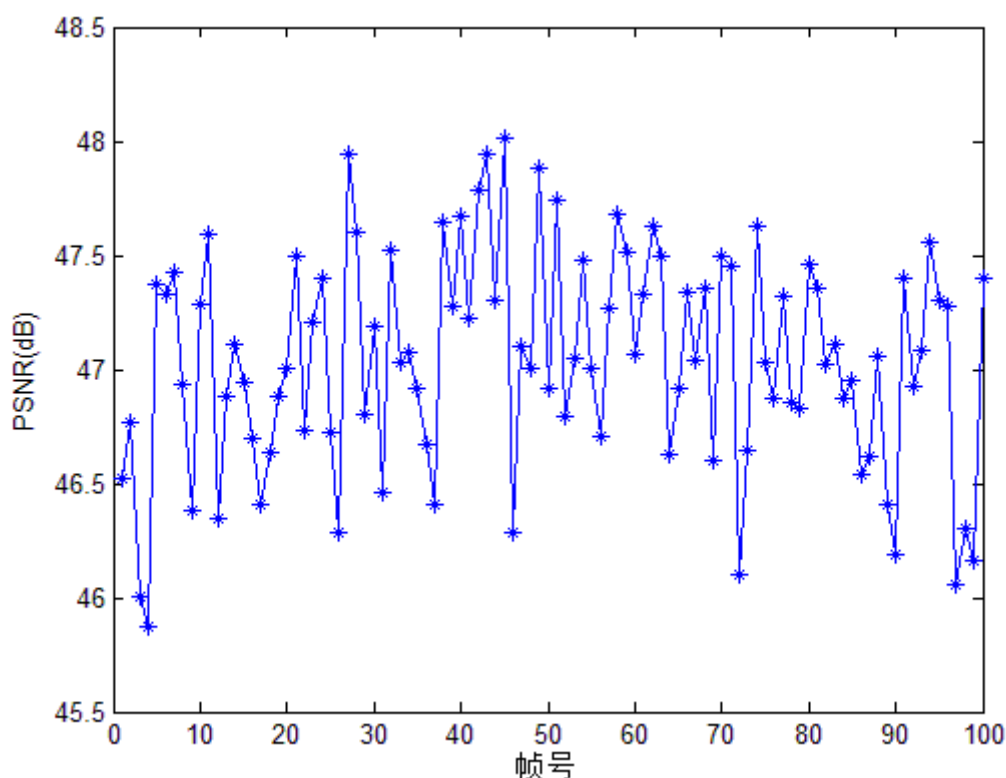


图 3.2 峰值信噪比检测曲线

（3）计算嵌入完成后的视频序列和原始测试视频序列之间对应画图像帧的峰值信噪比，从数学上对水印嵌入算法的不可见性进行评估，结果如图 3.2 所示。

（4）比较嵌入完成后的视频序列和原始测试视频序列之间的视频质量，从视觉

上对水印嵌入算法的不可见性进行评估，结果如图 3.3 所示。



图 3.3 水印嵌入前后视频图像对比

由图 3.2 所示的峰值信噪比检测曲线可以看出，每帧视频图像在水印嵌入前后的峰值信噪比都高于 45dB，很好说明了该视频水印算法具有良好的不可见性。由图 3.3 的视频图像对比图可以看出，嵌入水印后的视频图像与原始视频图像基本没有差别，人眼无法分辨出是否已经嵌入了水印信息。

### 3.4.2 鲁棒性测试

为了评测嵌入视频的水印信号的鲁棒性，就需要对含有水印信息的视频序列进行各种各样的攻击，然后来检测内含的水印信息是否受到损失。在测试过程中，一般将测试视频通过几何失真和增强视频处理攻击来确定含有水印的视频是否能够承受住



这些攻击的能力。本文中采用提取的水印序列和嵌入的水印序列之间的相关系数来说明算法对各种视频处理和攻击的鲁棒性。相关系数 NC(Normalized Correlation)的定义为:

$$NC = \frac{\sum_i W_0(i)W_1(i)}{\sum_i (W_0(i))^2} \quad (3-19)$$

其中,  $W_0(i)$  为原始嵌入的视频水印序列,  $W_1(i)$  为经过提取算法得到的水印序列。

鲁棒性测试过程如下:

(1) 按照水印嵌入算法的描述对测试视频进行水印嵌入操作, 得到含有水印信息的视频序列文件 ducks\_watermarked。

(2) 从已含水印信息的视频文件 ducks\_watermarked 中截取一段长度为 25 帧的视频片段 ducks\_25, 按照水印提取算法对视频片段 ducks\_25 进行水印提取操作, 并计算提取出的水印序列与嵌入的水印序列之间的相关系数。

(3) 对视频片段 ducks\_25 进行 H.264 编解码得到解码后的视频片段 ducks\_code, 按照水印提取算法对视频片段 ducks\_code 进行水印提取操作, 并计算提取出的水印序列与嵌入的水印序列之间的相关系数。

(4) 对视频片段 ducks\_25 进行帧删除操作, 得到帧删除后的视频片段 ducks\_drop, 按照水印提取算法对视频片段 ducks\_drop 进行水印提取操作, 并计算提取出的水印序列与嵌入的水印序列之间的相关系数。

(5) 从已含水印信息的视频文件 ducks\_watermarked 中截取一段长度分别为 50 帧、75 帧、100 帧的视频片段 ducks\_50、ducks\_75、ducks\_100。对每个视频片段进行上述步骤 (2) ~ (4) 的操作, 计算各种情况下的相关系数值。

(6) 上述操作完成后, 所有情况下的相关系数值如表 3.1 所示。

表 3.1 各种攻击下的鲁棒性分析

帧数	直接提取	H.264 编解码	帧删除攻击
25	0.984	0.908	0.906
50	1	0.947	0.921
75	1	0.973	0.937
100	1	0.989	0.953

由表 3.1 可知, 本算法具有较高的水印提取准确率, 在经过 H.264 压缩编解码的

视频处理后仍能较为准确的提取出水印序列，并对帧删除攻击有很好的鲁棒性；随着视频序列长度的增加，本水印提取算法能够对每帧图像提取的水印进行统计综合，逐步提高水印提取的准确率，并能有效抵抗对视频图像序列的帧删除的攻击。

### 3.4.3 实验结论

通过对基于 JND 门限和小波域自适应视频盲水印算法进行不可见性分析和鲁棒性分析，仿真结果证明了提出的视频水印方案的可行性和可靠性。能够在保证嵌入的水印信息不被人眼察觉的前提下，经过正常的 H.264 视频编解码后仍能准确的提取出水印信息，并能有效地的抵抗帧删除等视频攻击手段对水印信息的破坏。

## 3.4 本章小结

结合人类视觉 HVS 的特点，本文提出了基于 JND 门限和小波域自适应视频盲水印算法，利用二层小波变换后的中频部分 HL2 和 LH2 来计算能量，能量大的块为视频帧中纹理复杂区域，嵌入该区域具有较好的不可见性，因高频对角子带很容易在有损数据压缩中丢失，而且低通滤波与噪声干扰等常见的操作对其也会造成较大的影响，因而在水印嵌入过程中，应对角子带排除在外，只考虑水平和垂直子带的分块能量作为嵌入特征块。从实验结果来看效果比较理想，能够经受 H.264 的压缩，而且经过压缩后依然保持较好的鲁棒性。由于本算法是在每帧画面中嵌入了水印信息，这样可以有效的抵抗帧删除的攻击手段。

## 第 4 章 基于 BF609 平台硬件系统设计和盲检测算法实现

### 4.1 系统的总体设计

本系统是基于 BF609 平台的数字视频水印系统，主要由视频解码、视频水印处理两大部分组成。其中采用 ADV7842 芯片负责 720P 高清视频信号的解码，BF609 芯片负责高清解码信号的接收和视频水印的提取。实现的功能如下：

- （1）高清视频解码：能对 HDMI 输入的 720P 高清视频进行解码。
- （2）视频水印提取：通过对解码后的视频能够提取出其中的水印信息。
- （3）水印数据输出：对提取出的水印信息通过 UART、网络等方式进行输出。

总体设计框图如下：

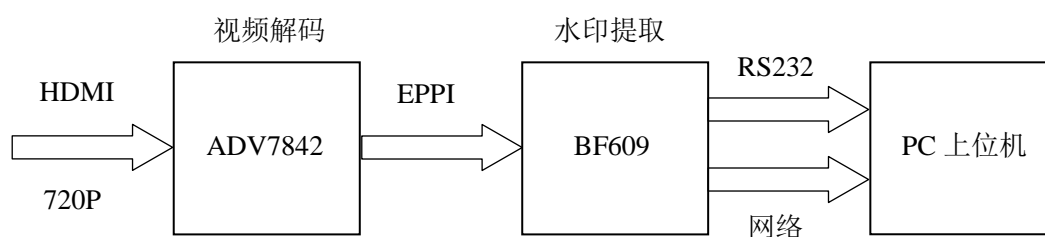


图 4.1 系统的总体设计框图

系统的工作过程工作如下：

- （1）高清数字视频信号通过 HDMI 输入模块采集，然后 ADV7842 对 HDMI 信号进行解码，解码后的信号为 YCrCb 信号。
- （2）将解码后的视频流通过 EPPI 接口传入 BF609 中，EPPI 模块可以通过配置从 YCrCb 信号中提取出 Y 分量信号，BF609 使用乒乓缓冲区来接收 Y 分量。
- （3）使用本文提出的视频水印盲检测算法进行水印的提取，计算出视频的水印信息。
- （4）将水印信息通过 RS232 或者网络输出至上位机。

### 4.2 系统硬件组成

#### 4.2.1 BF609 处理器

ADSP-BF609 处理器属于 Blackfin 双核处理器，采用 ADI/INTEL 微信号架构

(MSA), 工作频率高达 500MHz, 采用低功耗、低电压设计方法, 静态功耗非常低。ADSP-BF609 处理器每个核包含两个 16 位 MAC, 两个 40 位 ALU 和 40 位桶形移位 RISC 类寄存器和指令模式, 具有先进的调试, 跟踪和性能监视, 硬件支持高清视频分析, 主要用在从汽车电子到嵌入式工业, 仪表和马达控制等应用, BF609 的功能如图 4.2 所示。

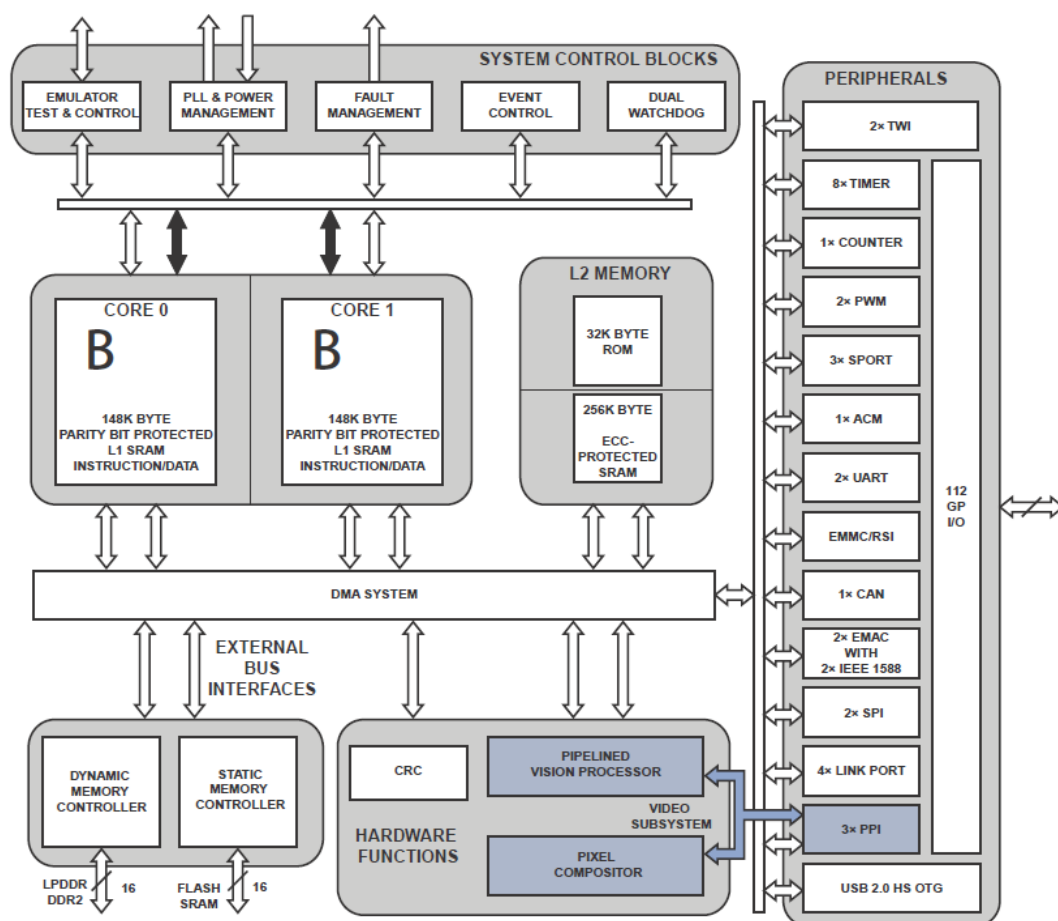


图 4.2 BF609 处理器功能框图

本文选择 BF609 作为处理核心的原因主要是：

### 1. 高性能

BF609 每个核的工作频率可达 500MHz, 最大可实现高达 2000MMACS 的运算速度。处理器内部存储器空间较大, 每个核具有独立的 148KB 的 L1 SRAM 存储器, 还具有片内共享 256KB 的 L2 SRAM 存储器, 片外 DDR2 存储器最大支持 256MB。BF609 还具有丰富的外设接口模块, 支持 FLASH、eMMC、SPI 存储器等多种引导模式。BF609 可具硬件 PVP 模块, 可以实现常用信号和图像处理算法, 从而有效降低视频算法的执行时间。

## 2. 低功耗

BF609 支持动态电源管理，静态功耗非常低，最高性能下处理器功耗小于 1W，非常适合对功耗要求严格的嵌入式领域。处理器提供了四种电源模式，各种模式具有不同的功耗和性能特征。如表 4.1。

表 4.1 BF609 电源设置

模式/状态	PLL	PLL 旁路	fCCLK	fSYSCLK fDCLK fSCLK	内核 电源
全开	使能	无	使能	使能	开
有效	使能/禁用	有	使能	使能	开
深度睡眠	禁用	—	禁用	禁用	开
休眠	禁用	—	禁用	禁用	关

## 3. 对图像算法的硬件支持

众所周知在图像、视频处理领域，庞大的数据量一直是处理的难点之一，在嵌入式处理方面，庞大的数据量不仅对 CPU 的性能提出了挑战，同时也在考验存储器、DMA 以致整个系统的性能。为了满足图像、视频领域处理的难点，BF609 内部设计使用了 EPPI、PVP 和 PIXC 组成视频子系统，这些模块可以任意互联，这些模块互联后组成的流水线结构如同一根根水管，使庞大的视频数据流可以从一个模块直接流向另一个模块，不需要存储器作为中间缓冲区，从而大大降低了处理器与存储器之间的数据传输压力，最大限度利用处理器性能。

### 4.2.2 视频输入与解码模块

视频输入与视频解码模块完成的功能主要是模数转换、视频解码，视频源分为模拟视频源和数字视频源两类。对于模拟视频源，数字处理器内核无法直接对其信号进行处理。视频信号必须首先通过视频解码器数字化，将模拟视频信号（如 NTSC、PAL、CVBS、S-Video）转换为数字信号形式（通常是 ITU-R BT.601/656 YCbCr 或者 RGB）。对于数字视频信号，如 HDMI 传输的 TMDS 差分信号，同样需要解码成数字信号形式，这是一个复杂的、多级的处理过程，包括从输入信号中提取时间信息、亮度与色度的分离，色度信息分离为 Cr 和 Cb 分量，输入数据的采样、量化、编码及为其分配适当的格式等。

ADV7842 是一款集成了模拟 (CVBS, RGB, 和 YPbPr) 和 HDMI 接收器 (HDMI Rx) 输入的高清视频解码芯片。该芯片内置一个双路输入 HDMI 1.4 兼容型接收器, 支持最高达 1080p 的所有高清电视格式, 显示分辨率最高可达 UXGA(1600×1200, 60 Hz)。

ADV7842 支持将 RGB/YPbPr 分量视频信号解码为数字 YCbCr 或 RGB 像素输出流。支持的分量视频包括 525i、625i、525p、625p、720p、1080i、1080p 和 1250i 等标准, 以及许多其它 SMPTE 和高清标准。它的输出接口非常灵活。像素输出总线最高支持 36 位 4:4:4。像素数据支持单通道和双通道两种数据速率模式。在 SDR 模式下, 可以实现 16/20/24 位 4:2:2 或 24/30/36 位 4:4:4 输出。在 DDR 模式下, 像素输出端口可配置为 8/10/12 位 4:2:2 模式或 24/30/36 位 4:4:4 模式。此外还支持总线旋转和总线反转。所有输出模式均通过 I<sup>2</sup>C 控制进行控制。其功能框图如图所示。

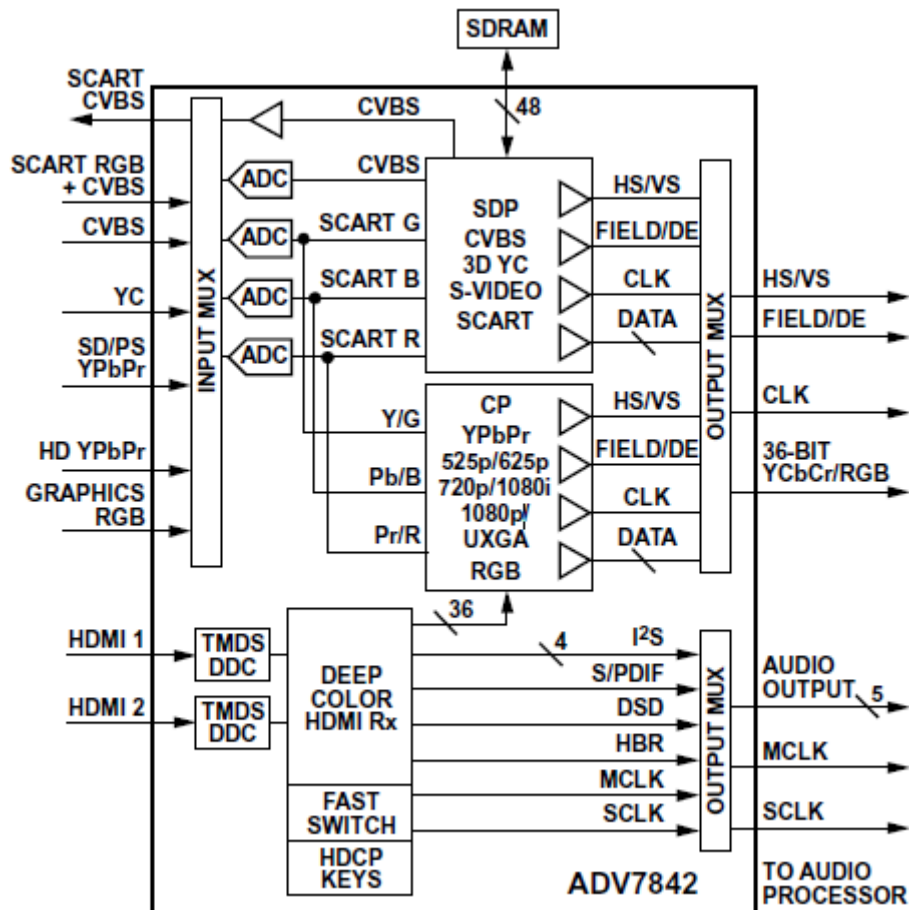


图 4.3 ADV7842 视频解码芯片功能框图

系统中 BF609 作为核心算法处理芯片、ADV7842 作为视频采集解码芯片, BF609 使用 TWI 接口配置 ADV7842 芯片, 使用 EPPI (Enhanced Parallel Peripheral Interface)

接口接收 ADV7842 芯片发送的 YCrCb 格式数字视频数据，使用 GPIO 来接收 ADV7842 发送的中断信号，使用 SPORT 接口来接收 ADV7842 发送音频数据。系统中 BF609 和 ADV7842 的连接如图 4.4 所示。

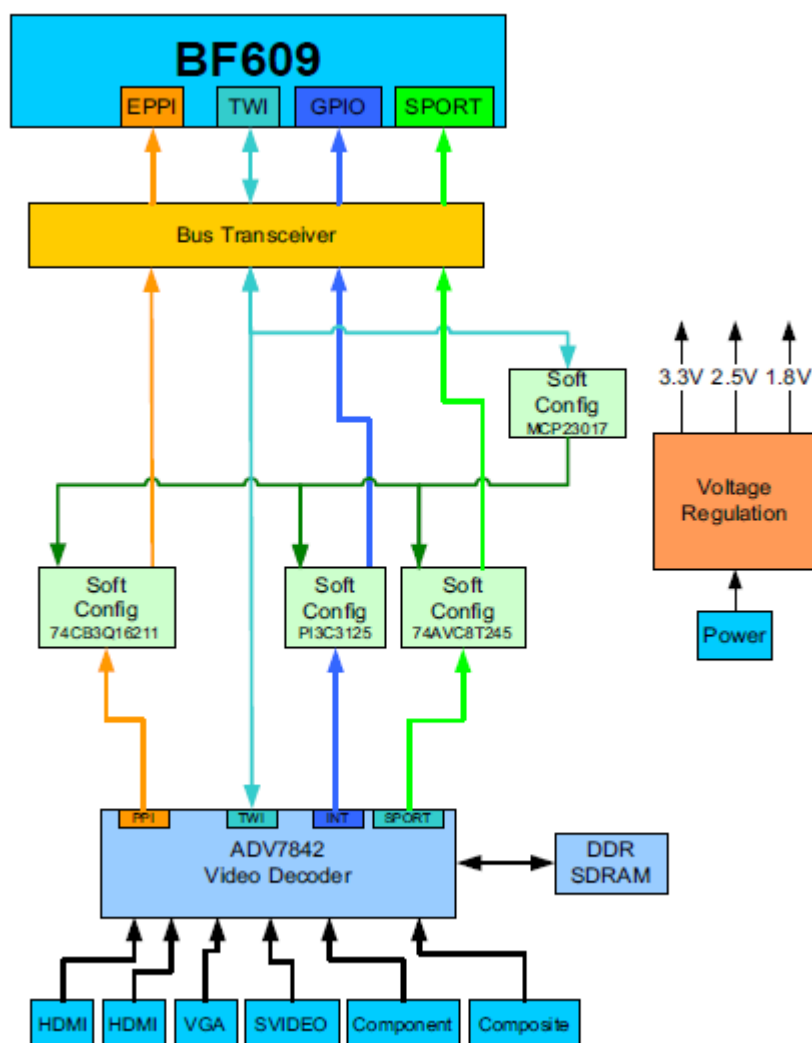


图 4.4 ADV7842 和 BF609 连接图

EPPI 接口是 BF609 处理器的一种功能强大的同步并行接口，不仅可以实现视频信号的无缝连接，还可以连接 AD 转换芯片等其他并行接口芯片。EPPI 接口特性如下：

- (1) EPPI 具有 24 个数据信号线、3 个同步信号和一个时钟信号，支持 8、10、12、14、16、18、24 位数据传输。
- (3) 同步和时钟信号宽度、极性可编程。
- (4) 支持 ITU-R 656 格式的视频输出。
- (5) 可实现 RGB888 向 RGB666 和 RGB565 的自动转换。

(6) 可实现 AD、DA、LCD、视频解码器、视频编码器芯片的无缝连接。

### 4.3 盲检测算法实现

根据第 3 章的水印提取算法,根据 BF609 平台的特点将水印算法分为三个个部分,视频预处理、小波变换、水印提取,其功能结构如图 4.5 所示。

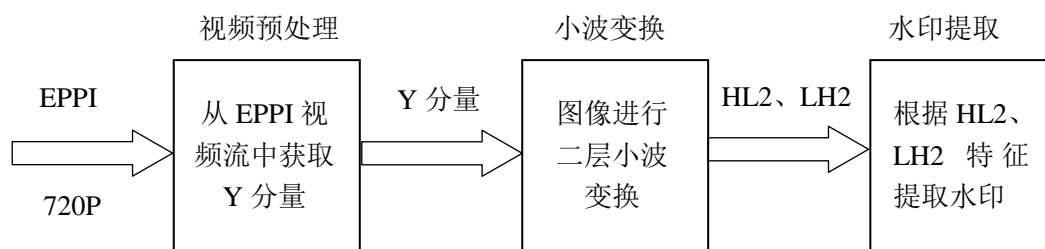


图 4.5 水印提取算法的结构

#### 1. 视频预处理

高清视频通过 HDMI 进入 ADV7842, 经过解码后变成 YCrCb 4:2:2 的视频数据, 通过 EPPI 传输进入 BF609。根据第 3 章提出的水印提取算法, 需要获视频数据中的 Y 分量构成灰度图像。为了增加 Y 分量获取的效率, 采用了 BF609 自带的 EPPI 模块的 Y 分量分离功能。该功能可以通过配置 EPPI 的寄存器实现。

由于系统需要实时处理视频, 故需要 Y 分量要采用乒乓存储的方案, 在 DDR2 SDRAM 内部建立两块视频缓冲区域 VideoBuffer0 和 VideoBuffer1, 用于实现视频帧的乒乓处理。

当完成一帧视频的存储之后(假如当前数据存储存储在 VideoBuffer0), 产生完成中断标志, EPPI 的 DMA 存储地址指向 VideoBuffer1, 启动 MDMA 传输 VideoBuffer0 中的数据到 L2 缓冲区, 参与小波变换的计算。

#### 2. 小波变换

对 1280 × 720 的单帧视频进行二层小波变换, 我们感兴趣的是二层小波变换后的 HL2 和 LH2。为了提高计算效率, 将其他的小波系数可以舍弃, 仅保留 HL2 和 LH2。

因进行小波变换时, 需要频繁读取 DDR2 中的 VideoBuffer0 和 VideoBuffer1, 所以无法使算法达到实时处理。故增加了两级缓冲, 在 L2 中建立两块临时存储乒乓缓冲区 vdata\_buf0 和 vdata\_buf1。将 DDR2 中的 1280 × 720 的单帧视频分块用 MDMA 传入 L2 中的 vdata\_buf0 和 vdata\_buf1。当 L2 的乒乓缓冲区满时, 开始进行该 L2 的缓冲图像块的小波变换, 计算小波变换前先将数据采用 32 位从 L2 中加载进 L1 中,



由此来加快小波变换的速度。单帧视频所有分块都计算完成时，该帧的小波变换完成。二层小波变换后的 HL2 和 LH2 存放在 DDR2 中

### 3. 水印提取

完成了小波变换后，进行水印提取，提取方法参考第 3 章，通过对 HL2 和 LH2 中均匀分区，然后再使用  $2 \times 2$  的块进行能量计算，在各个均匀分区中找出  $2 \times 2$  能量最大的块即为特征块，再从特征块中判断出水印信息。在 BF609 中实现时，主要考虑计算效率，需要将 DDR2 中的 HL2 和 LH2 先加载入 L1 中再进行计算。同时为了减少循环，将图像均匀分块和能量块计算程序进行合并，大大提高了水印计算的效率。

## 4.4 算法优化

对于嵌入式领域的程序来说，代码的执行效率不应该在程序编写结束后再进行优化，而应该从编码开始时就必须加以注意。采用 ADSP-BF609 处理器编写的应用程序大部分都是进行某种信号处理算法，因此在开始编写代码之前，首先需要确定当前选择的 DSP 处理器能否实现所提出算法。如果算法中部分细节不适于在 BF609 上执行，是否能够通过算法的硬件优化来解决此问题。通常算法级的优化比代码级的优化更为有效<sup>[48]</sup>。

一旦确定了算法，在编码时需要考虑数据宽度、数据量级问题。如果在一款 32 位 DSP 中大量使用 64 位或浮点数据，会大大增加处理器的负担。本文选择使用 BF609 处理器，此处理器是 32 位定点 DSP。本文在设计代码的时候，充分考虑的定点 DSP 处理器特性。为了保证系统的实时性，算法设计的各个步骤最大限度地避免了 64 位和浮点的数据运算，算法的关键步骤，如小波变换、能量块计算等都不包括任何浮点运算，甚至没有除法运算，最大限度降低算法复杂度。

本节主要针对算法确定后的存储器、编译器、C 代码优化进行讨论。

### 4.4.1 存储器分配与优化

#### 1. 存储器资源

BF609 内部存储器可分为三类，分别是 L1、L2 和外部 DDR2 存储器。双核可共同访问的存储区包括 L2 和 DDR2。因此，全部通信的数据、命令等数据结构，都应该放在共享存储区中。原则上需要大量计算的数据应先加载至 L1 中，以提高计算速度，较小且较重要的数据放在 L2 中，以提高读写速度；较大的数据放在 DDR2 中，

满足对存储的要求<sup>[49]</sup>。BF609 可用存储器空间资源分配如表 4.2。

表 4.2 BF609 的存储器资源

起始地址	大小	所属内核	说明
0x0000 0000	128MB	双核共享	外部 DDR2 存储器
0xC808 0000	256KB	双核共享	内部 L2 SRAM 存储器
0xFF40 0000	148KB	Core1 独立	内部 L1 SRAM 存储器，包括指令、数据、cache
0xFF80 0000	148KB	Core0 独立	内部 L1 SRAM 存储器，包括指令、数据、cache
0xFFC0 0000	2MB	双核共享	系统 MMR 寄存器
0xFFE0 0000	2MB	单核独立	内核 MMR 寄存器

## 2. 存储器性能测试

首先，针对 BF609 的整个存储器性能进行了测试，测试用数据为 8192 个字节，针对 DDR2、L1、L2 这三种存储器相互之间的数据搬移进行了测试。测试结果如表 4.3。

表 4.3 存储器性能测试

	S:L2 D:DDR2	S:DDR2 D:L2	S:L1 D:DDR2	S:DDR2 D:L1	S:L1 D:L2	S:L2 D:L1
for	10.72	5.83	20.74	5.21	20.41	10.14
lib	86.94	31.47	484.19	31.86	793.13	85.54
DMA	64.86	53.43	64.74	53.22	69.38	62.52

表 4.3 中数据单位为 MB/s，表示带宽。S 代表数据搬移操作的源地址所在区域，D 表示目的地址所在区域。第一列的“for”表示使用软件 for 循环实现；“lib”表示使用库函数 memcpy 实现；“DMA”表示使用硬件 DMA 实现。由表 4.3 可知，使用软件编写的 for 循环的数据搬移的效果最差，还占用 CPU 资源，编程时应避免使用 for 循环进行大数据量搬移操作。Memcpy 函数由于是经过汇编优化的，虽然仍占用 CPU 资源，但执行效率不可同日而语，在多组数据中都体现出最强的性能。但是其仍然需要占用 CPU 资源，因此使用时需要特别注意。DMA 模式下性能相对均衡，因此在进行小波变换前，采用 MDMA 将数据搬入 L2 中，同时不占用 CPU 的资源，提升算法效率。

## 3. 数据处理优化

外部的 DDR2 存储器读写速度较低，故在进行算法优化时，必须要考虑 DDR2 的

大数据量操作，分析整个系统和算法可知，针对外部 DDR2 存储器的大数据量操作一共有四种：

(1) 视频采集。由视频采集模块采集各种格式的视频后，直接保存在 DDR2 中。此操作为写 DDR2 操作。

(2) 水印算法计算过程中所必须的存储器访问操作。主要是小波变换时，需要读取 DDR2 中的图像数据，此操作为读 DDR2 操作。

(3) 保存 HL2 和 LH2。讲图像进行二层小波变换后，需要将二层小波系数 HL2 和 LH2 保存在存储器中。此操作为写 DDR2 操作。

(4) 水印提取。此操作需要从 DDR2 中读取二层小波系数 HL2 和 LH2，然后进行均匀分块、能量块计算，从而得出特征块。此操作为读 DDR2 操作。

为了满足算法和系统的正常工作，应该为上述每种操作分配相应的存储空间。同时为了保证 DDR2 存储器的高性能，应尽量避免频繁更改针对 DDR2 的读写操作方向，将可能同时存在读和写操作的不同缓冲区分为不同 Bank 存放，存储器分配请参考表 4.2。同时应该采用 MDMA 高效率、不占用 CPU 资源的方式，将 DDR2 中的数据搬移至 L1、L2 中，再进行处理。

#### 4.4.2 编译器优化

编译器优化是一种简单有效的快速降低代码运行时间的技巧<sup>[50]</sup>，这个技巧其实就是使能 C 编译器的 Enable Optimization 选项。如图 4.6。

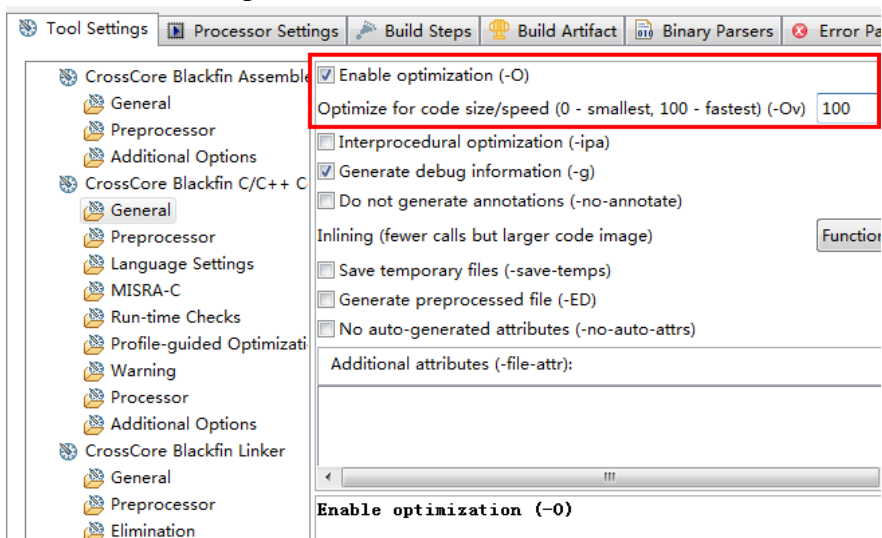


图 4.6 编译器选项开关和参数

CCES(CrossCore Embedded Studio)为用户提供了非常人性化的接口，直接打开和关闭 Enable Optimization 选项，同时可以根据不同的需求，调整优化的参数。从 0 到

100，分别表示空间最小优化法和时间最短优化法，其余的优化值处于 0 到 100 之间。如图 4.6。图中红色框内为编译器优化选项开关和参数。

但是开启编译器优化后，会使 Debug 变得困难，编译器自己会分析代码的结构，并作出适当的调整，这样就使得生成的目标代码与原始的 C 代码不能做到一一对应，且一些调试用的变量也将被编译器自动删除，给调试带来很大的不便。

表 4.4 给出了编译器优化选项打开和关闭时，本文提出的算法处理单帧在 BF609 内执行效率的对比，测试只使用单核进行。

表 4.4 编译优化选项打开和关闭对比

优化选项	单帧提取耗时（时钟节拍）
关闭	25,238,176
打开	9,747,304

#### 4.4.3 循环优化

在使用 C 实现的算法中，循环通常占据了很多时间。因此，如果可以将循环体重执行的执行的操作减少，获得的收益将是巨大的。

在循环优化中，十分重要的一个思想是将处理流水线化。在 BF609 中，取指令、取数据、计算、存储数据等操作是相互独立的，且 BF609 使用哈佛结构，指令总线和数据总线是分离的，所以能够通过流水线操作来达到更高的总线利用效率。

由于 Blackfin 的编译器性能十分优秀，本文不再编写汇编代码来对循环进行手工优化，只需要将循环调节为编译器更容易理解的形式，并添加额外的辅助信息来帮助编译器优化。

在调节循环代码时，通常遵循如下守则将使代码的执行效率最大化。

（1）减小循环体大小，避免涉及过多的运算步骤和变量。在处理大的循环体时，编译器会更难以理解循环体内部逻辑，所以更多的使用保守的优化方式，不利于优化。

（2）避免手动展开循环。用户手动展开的程序会另编译器更难理解循环的结构。

（3）减小循环体内部的相关性。避免出现第  $n$  次计算需要使用第  $n-1$  次计算结果的情况。

（4）多层循环的最内层重要性最高。若内层循环执行  $M$  次，外层循环执行  $N$  次，最好将计算次数多的放在内层循环，即尽量保证  $M > N$ 。

（5）在循环体内避免条件语句。条件语句通常意味着跳转，一旦跳转预测与实际发生的相反，将会产生流水线排空的延时，频繁打断流水线将使工作效率大幅降低。

(6) 在循环体内避免函数调用。由于函数调用前要按照要求做一些寄存器进栈等维护工作，不利于编译器优化。

(7) 选择合适的循环步长。如果循环能够被编译为硬件循环，通常会比软件进行模拟的循环快得多，而硬件循环只支持步长为 1 的循环。

(8) 循环体内数据的连续访问。访问的数据如果再存储器中是连续存放的，则连续的读写将会提高效率。

(9) 使用 16 位数据。由于 Blackfin 系列 DSP 内部拥有同时对多个 16 位数据进行运算的向量指令，所以循环体内使用 16 位数据，很可能被编译器自动转换为向量操作，从而成倍提高工作效率。

## 4.5 性能测试和分析

本节使用 720P 高清视频进行测试，视频每秒 25 帧，分辨率为 1280x720，采用逐行扫描方式。BF609 时钟设置为 500MHz 的内核频率，外部存储器为 128MB DDR2 存储器，开发环境为 ADI 公司的 CCES IDE，编译器优化设置为时间最短优化法。

表 4.5 给出了单核情况下单帧视频提取各部分性能和总体耗时。

表 4.5 单帧视频提取各部分性能测试

	小波变换	水印提取	算法总耗时
时间（时钟节拍）	6,530,428	3,216,876	9,747,304

由表 4.5 可知，算法最耗时的部分出现在小波变换计算的步骤，由于小波变换算法是由大量循环语句、大量的 DDR2 数据搬移、大量的计算组成，极大的影响了处理速度，因此其执行速度相比于其他部分要逊色一些。单帧视频提取算法最终的总耗时小于 10M 个时钟频率，根据制视频的帧率为 25 帧/秒，BF609 的内核频率为 500MHz，因此单核情况下就能视频水印的实时提取。

## 4.6 本章小结

本节详细论述了基于 BF609 平台的硬件系统设计和盲检测算法实现。首先，从整体上说明了系统的组成和各模块的基本功能。随后，按照 BF609 处理器模块、视频采集模块分别介绍了系统硬件和驱动设计的详细方案。然后提出了基于 BF609 平台的水印盲检测算法。针对多核处理器的特性，论述了如何实现本文提出算法的并行化移植，

同时设计了算法执行时的存储器优化、编译器优化、循环优化方案。最后，分别对给出了整个系统的性能测试结果，并对结果进行分析，验证系统的实时性。

## 第 5 章 总结和展望

### 5.1 论文工作总结

数字水印技术从 1993 年正式提出到现在, 得到了迅速的发展<sup>[51-52]</sup>。数字水印技术作为一门边缘学科横跨了信号处理、密码学和模式识别等多种学科领域, 应用越来越广泛, 这就给广大的研究工作者提供了相当大的挑战和发挥空间。它的出现得到了人们高度的重视, 其应用价值也得到了高度的体现。

本文就视频水印算法及系统设计与实现做了大量深入的研究, 分析了数字视频水印的相关技术及视频处理原理, 提出了一种基于 JND 门限和小波域的自适应视频盲水印算法。同时研究了视频水印算法的硬件实现方案, 设计了基于 BF609 平台的视频水印盲检测系统, 实现了对 720P 高清视频实时地进行水印提取。本论文主要工作有以下三点:

(1) 本文就视频水印算法及系统设计与实现做了大量深入的研究, 分析了数字视频水印的相关技术及视频处理原理, 阐明了原始域数字视频水印算法, 并对小波域数字水印的理论进行了研究。

(2) 提出了一种基于 JND 门限的小波域盲水印算法, 该算法利用了小波域多分辨率分析的特点, 与 JND 技术相结合, 对视频的每帧进行两层小波变换, 然后在第二层小波系数 HL2 和 LH2 中自适应的选择嵌入位置, 并且根据 JND 门限值选择水印嵌入强度。该算法在保持水印不可见的同时, 最大限度地提高了水印的嵌入容量, 并实现了水印在 720P 高清视频中的盲检测。随后对嵌入水印后视频进行了几种常见的水印攻击, 特别是进行了 H.264 的压缩攻击测试。实验结果表明本文算法具有较好的不可见性和鲁棒性。

(3) 基于 ADI 公司的 Blackfin 系列的 BF609 平台, 对数字视频水印提取算法进行研究, 将小波域的盲检测算法进行 DSP 实现和优化, 同时根据高清视频数据量大的特点, 充分利用 BF609 的 L1、L2 和 MDMA 的性能, 实现了对嵌入水印信息后的 720P 视频的实时提取。

目前, 数字视频水印领域的基本算法已经实现, 在 PC 机上的实验也能达到很好的效果, 但能够实际应用于嵌入式实时处理领域仍然较少, 主要原因还是因为视频处

理数据量过大，复杂度较高造成的，且随着视频分辨率的增大和帧率的提高，困难会越来越大。本文提出的算法和系统设计方案更适合多核处理器和低成本定点处理器中的应用，是一种可行的数字视频水印嵌入式实时处理解决方案，具有较高的实际应用价值。

## 5.2 未来研究工作的展望

本论文在数字视频水印算法的研究和基于 BF609 硬件平台实现技术方面取得了一定的成果，但由于时间的限制，还有许多没来得及完成和完善的地方，有待于进一步的分析和研究。未来研究工作主要集中在以下几个方面：

(1) 本文提出的基于小波域的数字视频水印技术，对于平移、旋转、缩放等几何攻击抵抗性较差，研究能抵抗几何攻击的数字水印方法是未来工作的重点。可以采用如图像归一化、图像质心、几何不变矩等方法来改进小波域的数字水印抗几何攻击能力。

(2) 数字水印的不可见性和嵌入容量是相互矛盾的，研究如何提高嵌入容量，同时提高不可见性是未来研究的一个方向。

(3) 基于 BF609 平台的数字水印盲检测算法虽然可以对 720P 高清视频进行水印提取，但随着人们对视频的清晰度要求越来越高，视频的分辨率的增大和帧率的提高是不可避免的，因此应该研究处理如 1080P 高清，2K、4K 超高清视频，以适应未来的发展，在继续改进算法和优化系统的同时，可能需要考虑选择性能更高的处理器。



## 参考文献

- [1] C.T.Hsu, J.L.Wu. Hiding Digital Watermarks in Image. IEEE Transaction on Image Processing. 1999, 8(1): 58-68.
- [2] M S Hsieh, D C Tseng and Y H Huang. Hiding Digital Watermarks Using Multiresolution Wavelet Transform. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(5): 875-882.
- [3] X.M.Niu, Z.M.Lu, S.H.Sun. Digital Watermarking Based on Error Correction Coding Technique. Image Processing & Communications, 2000, 6(1-2): 23-28.
- [4] Chiou-Ting Hsu, Ja-Ling Wu. Hidden Digital Watermarks in Images. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, 8(1): 58-68.
- [5] J.O Ruanaidh, T.Pun. Rotation Scale and Translation Invariant Spread Spectrum Digital Image Watermarking. Signal Processing, 1998, 66(3): 303-317.
- [6] Zhu Wengwu, Xiong Zixiang, Zhang Ya-Qin. Multiresolution Watermarking for Images and Video: A Unified Approach [J]. Proceedings Of International Conference on Image Processing, 1998, 1(67), 465-468.
- [7] Shelby Pereira, Joseph J O'Ruanaidh, Thierry Pun. Secure robust digital image watermarking using the lapped orthogonal transform. Security and Watermarking of Multimedia Contents [C]. San Jose, CA, USA, 1999: 21-30
- [8] Ming Sun Fu, Au O C. Data Hiding in Halftone Images by Stochastic Error Diffusion. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, 2001 (ICASSP 2001) [C]. Salt Lake City. USA. 2001: 1965-1968.
- [9] 魏鹏. 基于 DSP 的数字视频水印技术的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008
- [10] 楼偶俊. 基于特征的第二代图像与视频水印技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2009
- [11] 刘彤, 裘正定. 一种基于量化的图像水印方案[J]. 通信学报, 2002, 23(10): 89-92.
- [12] 牛夏牧, 陆哲明, 孙圣和. 基于多分辨率分解的数字水印技术[J]. 电子学报, 2000: 1-4.
- [13] 秦臻, 王新, 杜江, 薛向阳. 鲁棒数字图像水印综述[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(1): 1-2.
- [14] 孙向阳. 视频水印算法及在多媒体传输中的应用技术[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [15] 肖尚勤. 鲁棒数字水印算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [16] 王炳锡, 陈琦, 邓峰森. 数字水印技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版, 2003, 11-77.

- [17] 秦建军. 数字视频水印技术研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010.
- [18] 杜高峰, 王慧琴, 白梅. 基于关系的 DCT 域盲水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(11): 2026-2029.
- [19] 车生兵, 黄达, 李光. 基于视觉特性的半脆弱水印算法[J]. 通信学报, 2007, 28(10): 134-140.
- [20] 王勋, 凌云. 一种子块相关的半脆弱数字水印[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(5): 826-830.
- [21] 乔静, 袁海东, 樊永良, 王莎. 多媒体信息内容认证中的半脆弱数字水印技术[J]. 计算机应用, 2007(27): 268-270.
- [22] 陈明奇, 钮心忻, 杨义先. 数字水印的攻击方法[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(7): 705-711.
- [23] Frederic Deguillaume, Gabrella Csurka, Thierry pun. Countermeasures for unintentional and intentional video watermarking attacks. Security and Watermarking of Multimedia Contents II [C]. San Jose, CA, USA. 2000: 346-357.
- [24] 刘春庆, 王执铨, 戴跃伟. 常用数字图像水印攻击方法及基本对策[J]. 控制与决策, 2004, 19(6): 601-606.
- [25] W Trappe, M Wu, K J R Liu. Collusion-Resistant Fingerprinting for Multimedia. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing [C]. 2002: 3309-3312.
- [26] Frank Hartung, Martin Kutter. Multimedia watermarking techniques [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1079-1107.
- [27] 吕菱, 刘宇. 数字视频水印技术[J]. 微机发展, 2004, 14(10): 135-137.
- [28] 梁华庆, 王磊, 双凯, 杨义先. 一种在原始视频帧中嵌入的鲁棒的数字水印[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1281-1284.
- [29] 刘丽, 彭代渊, 李晓举. 抵抗线性共谋攻击的空域自适应视频水印方案[J]. 西安交通大学学报, 2007, 42(4): 456-460.
- [30] Mobasser B G. Direct sequence watermarking of digital Video using m-frames. International Conference on Image Processing[C]. Chicago, IL, USA, 1998: 399-403.
- [31] F Hartung, B Girod. Digital watermarking of raw and compressed video [J]. Digital compression Technologies and systems for Video Communication, 1996, 2952:205-213
- [32] 李英, 高新波, 姬红兵. 一种基于三维小波的视频水印空时算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 16-19.
- [33] 孙建德, 刘琨. 基于独立分量分析的盲视频水印方案[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1507-1510.
- [34] Frederic Deguillaume, Gabriela Csurka, Joseph J O Ruanaidh. Robust 3D DFT video watermarking.

Proceedings of SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, USA, 1999, 3657: 113-124.

[35] Swanson M D, Zhu B, Tewfik A H. Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 540—550.

[36] Tae-Yun Chung, Kang-Seo Park, Young-Nam Oh, Dong-Ho Shin, Sang-Hui Park. Digital Watermarking for Copyright Protection of MPEG2 Compressed Video [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(3): 895-901.

[37] Koch E, Zhao J. Towards robust and hidden image copyright labeling. Proceeding of 1995 IEEE workshop on nonlinear signal and Image Processing [J]. Neos Marmaras, Greece, 1995: 452-455.

[38] 周国志, 徐岩, 任连涛, 李桂苓. 基于 DCT 的数字视频水印算法研究[J]. 视频技术应用与工程, 2006, 9: 81-83.

[39] 郑振东, 王沛, 陈胜. 基于运动矢量区域特征的视频水印方案[J]. 中国图象图形学报. 2008, 13(10): 1926-1929.

[40] Hartung F, Eisert P, Girod B. Digital watermarking of MPEG-4 facial animation parameters [J]. Computer&Graphics, 1998, 22(3): 425-435.

[41] G C Langelaar, R L Lagendijk, J Biemond. Real-time Labeling Methods for MPEG Compressed Video. 18th Symposium on Information Theory [C]. Benelux, Veldhoven, 1997: 25-32.

[42] Koch E, Zhao J. Image-adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal on Special Areas in Communications, 1998, 16(4): 525-539.

[43] Houng Jyh Mike Wang, Po-Chyi Su, Jay Kuo C-C. Wavelet-based digital image watermarking [J]. Optics Express, 1998, 3(12): 491-496.

[44] A.B.Watson, G.Y.Yang. Visibility of wavelet quantization noise. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8): 1164-1174.

[45] 兰红星, 陈松乔, 胡爱娜, 李陶深. 基于小波域的第二代数字水印算法的研究[J]. 电子学报, 2007, 35( 9): 1999-1803.

[46] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准—H.264/AVC[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 97-104.

[47] 侯发忠, 邹北骥, 周支元, 刘召斌. 一种抗 H.264 压缩的数字视频水印新法[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(13): 3662-3665.

[48] 陈峰. Blackfin 系列 DSP 原理与系统设计 (第二版) [M]. 电子工业出版社. 2010: 307-312.

[49] 唐建. Blackfin 双核处理器与应用开发[M]. 电子工业出版社. 2010: 275-282.

- [50] Woon-Seng Gan, Sen M.Kuo. 基于微信号结构的嵌入式信号处理[M]. 电子工业出版社. 2008: 270-271.
- [51] 刘小勇, 数字水印发展的历史与发展前景. 计算机光盘软件与应用, 2010(7): 101-102.
- [52] 于帅珍, 数字水印技术的研究现状及进展. 大众科技, 2009(12): 210~211.

## 攻读学位期间发表论文与研究成果清单

- [1] Qiao Qiao, Fei Gao, Te Wang. The Design of Electronic Thermometer Based on Bluetooth Low Energy [C]. Proceedings of 2013 IEEE 4th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. 2013:316-320.
- [2] 李海宁, 高飞, 王特, 闫坤. 基于 FPGA 的高清数字水印高速处理系统设计技术研究[J]. 信号和智能信息处理与应用学术会议 (已录用).
- [3] 闫坤, 高飞, 王特, 李海宁. 基于 ARM 和 GPRS 的无线通信技术在数字水印系统中的应用研究和实现[J]. 信号和智能信息处理与应用学术会议 (已录用).
- [4] 温英新, 高飞, 王特, 王沙沙. 实时视频版权认证系统设计与实现[J]. 微计算机信息, 2012(12) (已录用).

## 致谢

两年半的研究生学习阶段即将过去，在此论文即将完成之际，我首先要感谢高飞教授。感谢高老师在我攻读硕士期间在学术上给予我的悉心指导，为我提供一个良好的工作和学习环境以及实践锻炼的机会。高老师一丝不苟的工作作风、严谨的治学态度和对工作的无私奉献精神，深深地影响了我，使我受益匪浅。在此，谨向两年多来培养、帮助和关怀我的高老师致以由衷的敬意和诚挚的谢意。

我还要感谢我的导师薛艳明老师，薛老师渊博的专业知识，严谨的治学态度，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。不仅使我树立了远大的学术目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多待人接物与为人处世的道理。在此，谨向薛老师致以深深的敬意和诚挚的感谢！

同时我还要对苏广川教授表示最深的谢意。苏教授严谨的治学态度、独特的学术思维、一丝不苟的工作作风，让我满怀敬意。苏老师虽年岁已高，但是却有着可贵的科研精神，项目中许多重点、难点攻关处都亲力亲为，奋斗在第一线，是我终生学习的榜样。不管是研究生期间的科研工作，还是本论文写作过程中，苏老师都给我许多的帮助，提出了很多宝贵的意见。在此我要向苏老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

除了三位老师之外，我还要感谢沈英老师、聂青老师、闫雪梅老师在这两年多时间里给我生活和学习上的帮助。

我还要感谢同一个实验室的孙成、闫坤、李海宁、乔乔、矫东航等同学和朋友，他们在工作学习中给了我无私的帮助和支持。感谢他们在我漫长的学业生涯中，给予我的全力支持和全心照顾；感谢他们给予我战胜困难的勇气和决心；感谢他们为我做的一切。

感谢我的父母，感谢他们的养育之恩。他们的不断鼓励 and 无私的付出是我不断前进的动力，他们始终是我坚强的后盾！

最后，衷心感谢在我之前人生中，给予我帮助和关心的所有人。