

基于 DWT-SVD 的视频水印的研究与实现

摘 要

数字水印作为一种信息隐藏技术，通过将版权信息嵌入影像中，可以有效地阻止版权侵犯和纠纷问题的发生。视频数字水印作为数字水印技术的一个分支，还可以用于广播监视、内容认证等领域。本文基于对视频数字水印技术的研究，主要工作如下：

（1）系统地介绍了视频数字水印的基本模型、分类、攻击方式、评价指标和相关研究现状。

（2）提出一种基于离散小波变换和奇异值分解的视频数字水印方案，配合标准化质心强度与滑动窗口机制对嵌入帧进行选取，将水印的奇异值嵌入经过二次离散小波变换和一次离散余弦变换的关键帧子图的奇异值中。使用关键帧的前一帧数据替代原始数据来辅助水印提取，并且引入奇异值纠正和动态筛选算法提高系统的容错率与效率。

（3）开展大量实验，包括测试水印透明性，模拟多种攻击方式对水印进行鲁棒性测试，并且通过实验对系统的创新设计进行评估。实验结果表明水印的透明性和鲁棒性表现良好，前帧替代、奇异值纠正和动态筛选算法有效提高了水印的鲁棒性以及系统效率和容错力。

关键词：数字水印，离散小波变换，奇异值分解，视频水印，离散余弦变换

Research and Implementation of Video Watermarking Based on DWT-SVD

ABSTRACT

As an information hiding technology, digital watermark can effectively prevent copyright infringement and disputes by embedding copyright information in images. As a branch of digital watermarking technology, video digital watermarking can also be used in broadcast monitoring, content authentication and other fields. This article is based on the research of video digital watermarking technology. Firstly systematic introduction to the basic model, classification, attack methods, evaluation indicators and related research of video digital watermarking. Secondly a video digital watermarking scheme based on discrete wavelet transform and singular value decomposition is proposed. The embedded frames are selected with standardized centroid strength and sliding window mechanism. The singular value of the watermark is embedded in the singular value of the second discrete wavelet transformed and the discrete cosine transformed sub-frame of the key frame. The previous frame is used as the original data for watermark extraction. The singular value correction and dynamic filtering algorithm are introduced to improve the system's error tolerance performance and efficiency. Lastly a series of experiments are carried out, including testing the transparency of watermarks, simulating noise, filtering, frame loss, and other attack methods to conduct robust tests on watermarks, and conducting comparative experiments against the innovative design of the system. The experimental results show that the previous frame approximation, singular value correction and dynamic filtering algorithms effectively improve the system performance, and the transparency and robustness of the watermark perform well.

Key words: digital watermarking, DWT, SVD, video watermarking, DCT

目 录

1	引 言	1
1.1	研究意义	1
1.2	本文的所做的工作	1
1.2	视频数字水印	2
1.2.1	视频数字水印的基本模型	2
1.2.2	视频数字水印技术分类	2
1.2.3	视频数字水印的攻击方式	4
1.2.4	视频数字水印的评价标准	5
1.3	研究现状	7
2	技术理论基础	10
2.1	离散小波变换	10
2.2	奇异值分解	11
2.3	离散余弦变换	11
2.4	规范化质心	11
3	本文模型与算法	13
3.1	模型与算法概述	13
3.2	嵌入算法	13
3.2.1	关键帧选择	13
3.2.1	单帧嵌入算法	14
3.3	提取算法	14
3.3.1	关键帧选择	14
3.3.2	单帧提取算法	15
3.3.3	水印动态筛选	16
4	实验部分	18
4.1	实验样本与参数	18
4.1	透明性测试	18
4.2	鲁棒性测试	19
4.3	设计评估	23
4.3.1	前帧替代	23
4.3.2	奇异值校正	24
4.3.3	动态筛选	26
5	总结和展望	28
5.1	总结	28
5.2	展望	28
	参考文献	30
	谢辞	32

1 引言

1.1 研究意义

计算机的诞生将图像与视频等影像信息从胶卷转化为数字信息，影像的复制、转移也变得随心所欲，伴随而来的同样有影像的盗取与侵权。随着互联网的诞生与不断发展，影像的获取和转移具有了远程、匿名与低成本等特点，而影像的盗取与版权的侵犯也越发猖獗。保护影像版权的方式主要有加密和数字水印两种^[1]。经过加密后的影像需要提供密码或者密钥进行解密，但是一旦被破解之后，影像则不再具有防御力，破解者可以进行盗取并任意传播。而数字水印作为一种信息隐藏技术，将信息嵌入影像中而不影响影像的感观，并且提供提取算法将信息从影像中再次提取出来。水印信息在被嵌入影像数据中与影像数据紧密结合，使影像具有持续的防御力。数字水印技术通过将如作者签名、出版标识等版权信息通过数字水印算法嵌入影像中，可以有效地阻止版权侵犯问题的发生。

数字水印的应用领域并不局限于版权保护，还可以运用于拷贝保护、内容认证等领域^[2]。拷贝保护是指系统在影像被复制之前通过提取水印检测拷贝行为是否被授权，从影像中提取出拷贝授权信息或者将水印信息中允许的拷贝数减一，以达到控制拷贝的作用。内容认证用于影像经过裁剪、剪辑等操作后对影像进行完整性检验。除此之外，数字水印还可以用于隐蔽信息通讯等应用。视频水印技术还具备广播控制等功能，即将水印信息实时嵌入数字广播中，防止其他广播电台盗取。

视频水印技术作为水印技术的一个分支，其嵌入载体为视频。与其它水印技术一样，视频水印技术要求在尽量不影响视频感观的前提下，对于各种针对视频的修改与攻击要具备足够的鲁棒性，即在视频被篡改后依然能够正确地提取出水印信息。在广泛的视频水印技术的研究中，提高鲁棒性始终是大多数研究的关注点与切入点。面对复杂多样的视频攻击，提高视频水印面对某种攻击的鲁棒性，或者提高视频水印的综合鲁棒性表现，是视频水印技术研究者孜孜不倦追求的目标。

1.2 本文的所做的工作

本文基于对视频数字水印技术的研究，主要工作如下：

- （1）系统地介绍了视频数字水印的基本模型、分类、攻击方式、评价指标和相关研究现状。
- （2）提出一种基于离散小波变换和奇异值分解的视频数字水印方案。水印嵌入阶段配合标准化质心强度与滑动窗口机制对嵌入帧进行选取，将水印的奇异值嵌入经过二次离散小波变换和一次离散余弦变换的关键帧子图的奇异值中。在提取水印时使用关键帧的前一帧数据替代原始数据参与水印提取，并且引入奇异值纠正和动态筛选算法提高系统的容错率与效率。
- （3）开展大量实验，选取四个测试视频样本进行测试，包括水印透明性测试，模拟高斯噪声、椒盐噪声、均值滤波、中值滤波、高斯滤波、JPEG 压缩、图像剪切、帧丢失、视频剪辑多种攻击方式对水印进行鲁棒性测试，并且针对系统的创新设计开展对比实验。实验结果表明前帧替代原始数据算法、奇异值纠正和动态筛选算法有效提高了系统性能，水印的透明性和鲁棒性表

现良好。

1.2 视频数字水印

1.2.1 视频数字水印的基本模型

数字水印是一种信息隐藏技术，其基本思路是利用影像大量的冗余数据，将水印信息通过嵌入算法嵌入影像数据中，并且支持通过提取算法将水印信息再次从影像中提取出来。数字水印可以根据嵌入载体的不同分为音频数字水印、图像数字水印以及视频数字水印等。视频数字水印作为数字水印的一个分支，以视频作为嵌入载体。其基本模型如图 2.1。

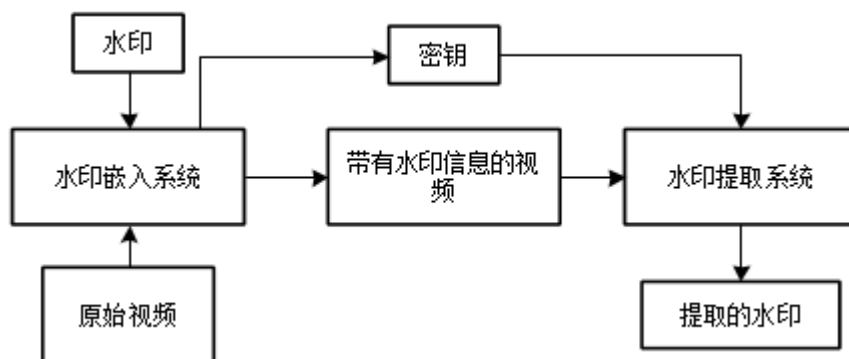


图 1.1 视频数字水印基本模型

视频数字水印技术的基本模型分为嵌入系统和提取系统。嵌入系统接收待嵌入水印与视频为输入，通过水印嵌入算法将水印嵌入视频中，同时生成相关密钥，该密钥可存储嵌入算法的相关参数等信息，其用途是作为水印提取系统的输入正确地提取出水印或者解密水印。水印提取系统以带有水印信息的视频和密钥为输入，从视频中提取出水印但并不对视频做任何修改，即水印提取出后视频仍然保留水印信息。缺少密钥或者提供错误的密钥将导致水印无法提取或者解密失败。

除了基本模型中提到的要素外，为了进一步提高水印系统的安全性，许多系统在嵌入水印前还会对水印进行预处理。水印置乱是常用的一种水印预处理手段，置乱算法可以将水印中的像素点打乱，使人眼无法识别水印图像，置乱算法也同样提供将置乱后图像复原的方法，其复原算法所用的参数通常存储在密钥中，在提取水印时只有提供正确的密钥才能成功复原提取出来的水印，否则即便提取出水印，置乱效果也会使水印无法被辨认和识别。

1.2.2 视频数字水印技术分类

视频数字水印技术多种多样，跟据不同的分类标准会得到不同的分类结果。分类标准的层次也不同，大体来说数字水印的分类层次为两层：嵌入数据域与嵌入算法。嵌入数据域表示水印嵌入到何种形式下的载体数据域，例如载体压缩后的数据域，或者是经过某种变换后的数据域，而嵌入算法是指如何将水印信息嵌入到指定的载体数据域中。

视频数据域的划分也大体具有两个层次，一是嵌入的数字域是否经过了压缩，二是嵌入的数

据域是否在原基础上经过了某种变换，例如离散小波变换（DWT）、离散余弦变换（DCT）等。水印嵌入的数据域可以是既经过了压缩又经过了变换的数据域。若水印嵌入的数据是视频解压后的各个像素点，则水印的嵌入的数据域为空域。与视频时间轴相关的数据信息则称为时域，时域和空域统称为时空间域。

视频常见的压缩方式有 MPEG-2、MPEG-4、H.264 等，也称为编码方式。由于视频中相邻近帧的存在大量的重复和冗余数据，各种编码方式在编码时会对数据进行压缩。不同的编码方式对视频的压缩方式和程度也不尽相同。通常情况下视频的数据都是以某种压缩形式呈现的，因此基于压缩域嵌入的视频水印技术不用像时空域一样需要解压视频后才能嵌入水印。将水印直接嵌入压缩域中，省去了解压和编码的工作，可以有效地提高水印嵌入的效率，使水印系统的实时性显著提高。例如在广播监视中，视频信息实时传送，若将水印嵌入在非压缩域中，需要将视频信号解码，浪费大量时间，导致视频码率降低，质量下降。而基于压缩域的水印技术无需解压视频信号，可以实现实时嵌入水印，因此也被广泛应用在对实时性要求较高的系统中。但是由于各种编码方式的差别，基于压缩域的数字水印往往是基于某一种编码方式而言的，因此基于压缩域嵌入的视频水印技术在各种压缩方式间流通性较差，对于多种编码方式需要设计多种方案。而基于时空域的视频水印技术则专注于视频解压后的图像或者时间信息，不需要考虑由编码方式不同而带来的复杂性，在不同编码方式下流通性强。

无论视频数字水印技术是基于压缩域还是时空域的，在嵌入数据域前都可以对数据域进行再变换，例如离散小波变换（DWT）、离散余弦变换（DCT）、离散傅里叶变换（DFT）等，这些变换可以提取数据中的频率信息，将数据域变换为频率域，并且这些变换都是可逆的，水印在嵌入变换域后载体可以通过逆变换恢复原来的形式。视频水印通常嵌入频率域中的高频信息，即载体的诸如轮廓等细节信息，以提高水印的不可见性。而诸如离散余弦变换这一类变换方式，可以将影像中的高低频信息按照某种分布呈现，当水印信息嵌入低频信息后再对影像进行逆变换时，水印信息也会随之分布到整个影像中，由此水印的不可见性、鲁棒性以及安全性能得到提高。变换域也是数字水印技术常用的嵌入数据域。

视频数字水印技术的嵌入算法比起嵌入的数据域种类来说更加多样和具体，难以系统地概括。比较常见的有最低有效位法（LSB）、扩频水印算法、奇异值分解法（SVD）等等。最低有效位法较为简单，其思路是将水印信息替换数据的最低位，使在嵌入水印的同时尽可能降低水印对载体的影响。但该方法的鲁棒性较差，小幅度的攻击也能轻松破坏嵌入在最低位的水印信息。扩频水印算法的基本思想是将一位水印信息扩展到多位宿主信息上，虽然水印信息被扩展到了较宽的信号，但是其对载体的影响也被减小了，水印信息也更加难以察觉和干扰^[3]。

最低有效法和扩频水印算法通常用于嵌入二值图像，而奇异值分解法则更适用于灰度图像以及彩色图像。奇异值分解法的基本思路是嵌入水印的奇异值而非水印的各个像素点，其嵌入载体也通常是载体的奇异值。奇异值分解也可以看做是对数据域进行了变换，只不过奇异值分解法提取的奇异值不仅可以是载体的奇异值，也可以是水印的奇异值。奇异值概括了水印和视频的特征，在视频受到各种攻击的情况下稳定性较好，使得水印的鲁棒性的表现相对较强。并且由于嵌入的数据是水印的奇异值，相当于嵌入了水印降维后的信息，故嵌入容量也大大增加。但是奇异值分解法在提取水印时需要原始图像和原始水印信息的辅助，以提取水印的奇异值并通过奇异值

复原水印，是一种非盲提取的水印技术。将部分水印信息通过密钥的形式存储，在水印提取阶段时提供密钥以正确重构水印信息，如果没有提供含有水印部分信息的密钥，即便得到了水印的奇异值，也无法重构水印信息，因此奇异值分解法可以潜在地提高水印的保密性与安全性。

除了根据嵌入数据域和嵌入算法分类外，视频数字水印^[4]还可以根据水印的可见性分为可见水印与不可见水印；根据其鲁棒性可分为脆弱水印、半脆弱水印和鲁棒水印；根据水印提取过程是否需要原始载体数据或者原始水印数据，可分为全盲水印、半盲水印和非盲水印算法。

1.2.3 视频数字水印的攻击方式

视频数字水印技术将水印嵌入视频之后，视频可能会遭到修改与攻击。视频水印技术要求水印宿主在被攻击后仍然能够正确地提取出嵌入的水印信息。针对视频的攻击方式多种多样，目前尚未有能够抵御所有攻击的完美视频水印技术，而提高视频水印的鲁棒性一直以来是研究者关注的重点和追求的目标。视频数字水印的主要攻击有^[5-8]：

（1）图像攻击

对于静态图像的攻击同样适用于视频帧中，图像攻击可以施加在视频的部分或者所有帧中。图像攻击可以继续细分为以下几个类别：

a. 噪声攻击

噪声攻击是图像和视频常见的攻击方式，包含高斯噪声、椒盐噪声等。高斯噪声指噪声符合高斯分布；椒盐噪声则是一系列黑白噪点，黑噪点称为椒噪声，白噪点称为盐噪声，椒盐噪声也被称作脉冲噪声。

b. 几何攻击

几何攻击主要包含视频帧的旋转、缩放、平移和剪切等，这几类攻击也称为同步攻击，其可以破坏视频帧的空间同步性，如果视频水印算法并没有针对某种几何攻击做特别的设计，则几何攻击容易对水印带来毁灭式的破坏。

c. 增强和量化攻击

增强和量化攻击主要包含滤波处理和锐化。滤波处理的初衷是抑制图像的噪声，但是会带来图像细节的损失，主要包括高斯滤波、均值滤波与中值滤波等。锐化则是增强图像的边缘部分，使图像轮廓更加清晰。

d. 压缩攻击

图像的压缩可以有效减少图像冗余数据带来的存储空间浪费。JPEG 压缩是图像压缩中较为常见的有损压缩方式。

（2）视频编码压缩

由于视频相近帧间的高度相似性，视频数据存在着大量冗余数据。多种视频编码方式在视频编码时会压缩视频的冗余数据。常见的编码标准包括 ISO/IEC 动态图像专家组的 MPEG-1、MPEG-2、MPEG-4，ITU-T 视频编码专家组的 H.261、H.263，以及由 ISO/IEC 与 ITU-T 联合组成的联合视频组提出的 H.264 等。

（3）视频特殊攻击

视频特殊攻击是视频区别于静态图像所特有的攻击方式，主要在视频传输以及修改中发生，

包括帧丢失、帧置乱、帧重组等。

（4）拷贝攻击

常见的拷贝攻击为帧平均，即将视频帧替换为其相邻帧与本身的平均，是一种利用统计信息估计初始载体或水印信息的攻击，也称为共谋攻击。

（5）分析攻击

分析攻击是一种尝试对水印信息进行估计并抽离的攻击方式。

（6）解释攻击

解释攻击的基本思路是通过生成嵌入了伪水印数据的载体以造成对真水印的干扰。

1.2.4 视频数字水印的评价标准

视频数字水印的基本要求是在不影响载体感观的同时，对于载体可能出现的修改与攻击有较高的鲁棒性，即在视频遭受攻击后仍然能够正确地提取出水印信息。除不可见性和鲁棒性外，视频数字水印技术的评价标准还包括一些关于嵌入和提取系统的要求等。视频数字水印的评价标准主要包括以下几个方面：

（1）透明性

数字水印的透明性也称为不可见性，要求水印的嵌入尽量减少对载体的影响，并且不能轻易被人眼或者识别系统侦查到。不具备透明性的视频数字水印也称为可见水印。

评价数字水印透明性的标准分为主观标准与客观标准。主观标准即为人眼是否能察觉或者识别出嵌入的水印信息，水印载体的变化是否引起了注意。ITU-R Rec.500 质量等级评判标准为水印透明性的主观评测提供了参考标准，其将嵌入水印后的载体的损坏程度分为 不可察觉、可察觉但不令人厌烦、轻微令人厌烦、令人厌烦、非常令人厌烦从高到底五类。

主观标准因人而异，因此在研究和讨论数字水印时，常常需要引入客观标准。评价数字水印透明性的客观标准的基本思想是检测嵌入后载体与原始载体间的差别，最常用来衡量这一差别的参考指标为峰值信噪比 PSNR。其计算公式如下：

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (1.1)$$

计算公式中 MAX 指的是灰度级，适用在灰度图像时通常表示灰度值的最大值，对于一个 8 位的灰度图像来说 MAX 一般取值为 255。MSE 指的是均方误差，均方误差表示的是原始图像与嵌入水印后的图像的对应像素点间的平均方差，其计算公式如下：

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} ||I(i,j) - K(i,j)|| \quad (1.2)$$

其中 $I(i,j)$ 指的是含有水印的载体帧在 (i,j) 位置处的像素值， $K(i,j)$ 指的是原始载体帧在 (i,j) 位置处的像素值，原始视频帧 I 以及 K 的大小为 $m \times n$ 。MSE 同样可以用于衡量两幅图像间的差距，但是 PSNR 将各深度图像，如灰度图像、归一化图像等用统一标准衡量，更加直观和方便。

PSNR 的单位是分贝（dB），其值越高，则说明两幅图像间的差别越小，嵌入水印后的载体失真度越小。较高的 PSNR 值是视频数字水印良好透明性的表现。

（2）鲁棒性

数字水印的鲁棒性是指水印系统在含有水印的载体经过一系列篡改和攻击之后仍然能较好地提取出正确的水印信息的能力，鲁棒性也是衡量视频数字水印性能的重点。针对视频的攻击方式多种多样，其破坏水印信息的机理也不尽相同，大多数视频数字水印的研究都是基于某种方法的探索或是针对某一类视频攻击展开的，目前尚未有能够抵御所有形式攻击的视频水印技术。提高视频水印对于各种攻击的抵抗力，增强视频水印鲁棒性是视频数字研究领域不变的热点。

衡量视频数字水印的鲁棒性的基本思想是通过水印技术提供的提取算法，将水印从载体中提取出来，并与原始水印比较差距。与载体间比较差距所用 PSNR 不同，提取的水印和原始水印间的差距衡量一般使用归一化系数或误码率衡量。其中归一化系数一般用于灰度或者彩色水印中，而误码率常用于二值水印中。

归一化系数（NC）是视频水印研究领域普遍使用的鲁棒性衡量指标，多用于灰度水印中。其计算公式如下：

$$NC = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W'(i,j)W(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W'(i,j)} \sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W(i,j)}} \quad (1.3)$$

其中 $W'(i,j)$ 代表提取出的水印在 (i,j) 的像素值， $W(i,j)$ 代表原始水印在 (i,j) 的像素值，原始水印和提取出的水印的大小为 $m \times n$ 。NC值的值域为 $[-1,1]$ ，其值越接近 1 则说明两幅图像间的差别越小，水印的鲁棒性也越好。对于多通道的彩色图像而言，NC 值的计算公式如下：

$$NC = \frac{\sum_{z=0}^{c-1} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W'(z,i,j)W(z,i,j)}{\sqrt{\sum_{z=0}^{c-1} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W'(z,i,j)} \sqrt{\sum_{z=0}^{c-1} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W(z,i,j)}} \quad (1.4)$$

其中 $W'(z,i,j)$ 代表提取出的水印在第 z 通道上 (i,j) 的像素值， $W(z,i,j)$ 代表提取出的水印在第 z 通道上 (i,j) 的像素值， c 是该水印的通道数，当水印为单通道灰色图像时， $c = 1$ ，则 NC 值的计算公式等同于（1.3）。

误码率（BER）是另外一种视频水印研究领域普遍使用的鲁棒性衡量指标，与归一化系数不同的是，误码率多用于二值水印系统中。其计算公式如下：

$$BER = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} ||W'(i,j) - W(i,j)|| \quad (1.5)$$

其中 $W'(i,j)$ 代表提取出的水印在 (i,j) 的像素值， $W(i,j)$ 代表原始水印在 (i,j) 的像素值，由于 W 和 W' 均为二值图像，所以 $W'(i,j)$ 和 $W(i,j)$ 的取值只有两种情况，一般情况下为 0 和 1。简单来说误码率就是提取出来的水印的像素点相对于原始水印的正确率，其值域为 $[0,1]$ 。误码率越接近 1，说明二值图像间的差距越小，水印的鲁棒性也越好。

提高水印鲁棒性最简单直接的方式就是加强水印的嵌入强度，这种方法在许多水印算法中适用。但是提高嵌入强度就意味着加大对载体数据的改变，影响水印的透明性。因此水印的透明性

和鲁棒性通常都处于对立的位置，水印的透明性和鲁棒性间的平衡是一个优秀水印系统的重要指标。

（3）可靠性

数字水印的可靠性是指检测水印是否存在于载体的结果的可靠性，也就是在对带有水印的载体进行检测时应该尽量检测出存在水印，在对不含有水印的载体进行检测时应该尽量判断出该视频不含有水印。数字水印的可靠性衡量指标有误检概率和漏检概率。误检概率是对不含水印的载体检测出含有水印的概率，漏检概率是对含有水印的载体检测后判断出不含有水印的概率。这两种概率的值越低，表示水印的可靠性越高。

（4）盲检性

数字水印的盲检性指的是在水印提取阶段不依靠任何原始载体信息以及水印信息就能正确提取水印的能力，具备盲检性的水印也称为全盲水印，在提取水印阶段需要部分载体或水印信息的水印技术为半盲水印，需要全部信息的则为非盲水印。数字水印应当尽量做到盲检，但视频水印是否具有盲检性通常由其嵌入算法所选用的方法决定。诸如扩频水印技术与量化水印技术可以做到全盲检测，而基于奇异值分解的水印技术则通常是半盲或者全盲。

（5）实时性

视频数字水印的实时性是指水印系统能够实时对视频信号进行嵌入，不影响视频信号的码率与传输。在一些特别的应用场景，比如广播监视中，视频信息不断地从信号源发送至广播站，监视系统则需要实时地对信号进行嵌入，否则将会影响视频码率导致视频质量下降。视频数字水印的实时性对水印算法的速度与效率提出了较高的要求。

1.3 研究现状

在众多视频数字水印技术中，基于变换域的数字水印是最普遍也是性能较好的一类视频水印技术。变换域是在视频的时空域或者压缩域上经过变换得到的数据域。常见的变换方式包括离散余弦变换域(DCT)、离散小波变换域(DWT)等等。基于奇异值分解的视频水印技术也可以看做是基于变换域上的水印技术。

在实际的视频水印系统技术中，各种变换常常相互叠加，许多算法会综合应用多种变换域以达到更好的水印性能。如包宋建^[9]等提出将 DWT 与舒尔分解相结合的数字水印算法，将视频帧从 RGB 转换为 YUV 矩阵格式，并通过两级离散小波变换生成 7 个子图，将舒尔变换应用在其中的 HL_2 子图中后嵌入与该子图等大小的水印。该算法具有较好的透明度，在帧交换与帧平均攻击下有较好的抵抗力，特别是在旋转攻击下表现十分突出，但由于水印分布在多个视频帧中，在帧丢失攻击的情况下鲁棒性不足。熊祥光等^[3]提出将 DWT 与 DCT 结合的视频水印算法，该算法能较好的抵抗 JPEG 压缩，但在帧平均攻击中表现不足。为了抵抗诸如帧平均一类的针对视频数字水印的共谋攻击，周惠^[10]等将水印信息分布到不同场景的镜头中，对每一帧的亮度分量分块进行 DCT 变换，并且基于变换域的内容对嵌入区域进行分类，计算水印嵌入区域位置后采用奇偶校验法嵌入水印数据。需要注意的是该算法使用二值水印嵌入的算法嵌入了灰度图像，将灰度图像的每个像素扩展为 8 位二值进行嵌入，这种方法虽然充分考虑了共谋攻击的影响，但是将灰度像素按位嵌入的方法突出了高位比特不稳定性对于整个水印鲁棒性的巨大影响，最终水印表现不

甚理想。刘绍辉^[11]等同样采用 DCT 变换以及基于视频内容计算水印嵌入位置，利用局部可容忍最大失真的值作为水印嵌入的系数得到一种基于视觉内容的自适应扩频水印方案，对第一类和第二类线性共谋攻击具有良好的鲁棒性，但是该方法并未讨论视频嵌入帧的自动选取方案。

在视频数字水印中，如何选择哪些视频帧进行嵌入影响着视频嵌入效率以及水印的鲁棒性，一些视频水印算法嵌入帧的选取与嵌入算法没有关联，水印被重复地嵌入多帧中，但在某些算法中嵌入帧的选择需要服务于算法，嵌入帧选取算法需要配合水印提取算法才能正确提取出水印，例如姜孟杉^[7]将二值水印信息的每一位嵌入一段连续的视频帧中，从而将嵌入的水印信息分散到视频的各个片段。水印信息对应的嵌入帧由视频的时间轴划分。该视频水印的透明性较强，但稍大规模的帧删除或帧重复攻击会使时间轴失去同步，导致水印对这两种攻击的抵抗力下降。在一些嵌入帧选择与嵌入算法相对独立的水印系统中，嵌入帧常常为能够代表视频场景节点的帧，这种帧被称为关键帧。关键帧通常是基于某一种关于图像的指标值进行选取的，当这种指标超过一个阈值或者满足其他要求，则该帧被视为关键帧。这种指标可以是帧间相对运动距离，其可以通过帧间旋转向量和平移向量计算得到；也可以是帧图像的复杂度，这种选帧方法认为在复杂度较高的帧中进行水印嵌入可以提高水印的透明性。衡量图像复杂度的参考量多种多样，包括信息熵、反差、边缘比率等^[12]。周支元^[13]等提出使用标准化质心（NCG）的强度来衡量图像的复杂度，NCG 强度计算方法将图像在 x 轴和 y 轴上求得平均后利用平均值做进一步计算，相当于给图像进行降维处理后再计算纹理复杂度，其算法复杂度有较大的提升，也是本文选取关键帧的指标。而在该方法中关键帧的选取标准则取决于 NCG 强度是否超过某一阈值，若超过则将该帧视为关键帧，虽然在关键帧的选取上效率高，但是容易造成关键帧堆积在某一个连续片段，在视频遭到剪辑后容易造成关键帧大量丢失，导致水印无法提取。吴静丽^[14]等运用主成分分析（PCA）将视频帧进行降维操作，再使用 K 均值聚类对降维后的信息进行分类得到关键帧。由于视频帧间的相似度较高，各种选取关键帧的指标比较接近，在水印嵌入以及视频遭受攻击后容易造成指标错乱，导致在水印提取阶段无法选中正确的关键帧。李弋星^[15]等将在识别关键帧的同时，删除冗余的关键帧，该方法在水印提取阶段能够更加精准定位关键帧。

本文所采用的基于 DWT 与 SVD 的水印技术的基本思路是将水印的奇异值提取出来嵌入宿主图像关键帧在 DWT 变换域上的奇异值中。这种方法由静态图像水印的嵌入算法衍生而来，在视频水印技术中配合关键帧的选取算法进行重复嵌入。基于 DWT 与 SVD 的数水印法首次由 Ochoa^[16]等提出并用于图像水印领域，后来被许多视频水印算法使用。毕洪波等^[17]对视频帧的亮度分量 Y 进行 DWT 变换后在 HL 自带进行奇异值变换并嵌入水印的奇异值。李新宇等^[18]提出对视频帧图像亮度分量后的分块进行 SVD 分解，取得最大奇异值矩阵进行 DWT 分解并选取低频子带再次进行 SVD 分解，最后通过量化水印技术嵌入水印信息，该算法提高了传统 DWT-SVD 视频水印算法对于噪声与滤波攻击的鲁棒性，并且选择量化水印技术规避了奇异值分解法所带来的非盲性提取问题。Tanya Koohpayeh Araghi^[19]等将水印进行复制并扩展与载体同等大小，对载体和水印均进行 16×16 分割，再对扩展水印图像和载体均施加 DWT 和 SVD，利用第二最低有效位进行嵌入，该方法可以实现小于载体大小的任意大小水印在任意大小载体上的嵌入，并且在几何攻击上的鲁棒性表现突出，但是算法复杂度较高。陈玉麟^[4]对视频帧图像进行 2 级 DWT 变换后，对 LH_2 子带进行 Arnold 置乱，并对置乱后的子带区域作 DWT 变换，再将 HH_3 子带作两

次 DWT 变换，最后将水印奇异值嵌入 DWT 域上的奇异值中，这种算法的鲁棒性突出，并且利用嵌入帧中蓝绿通道的相似性，避免在水印提取过程中需要原始载体信息。但是该算法的单帧嵌入算法需要对载体实施多层变换，复杂度较高，而且由于采用均方差指标选取蓝绿通道接近的视频帧，在嵌入帧选取阶段就需要耗费大量的时间。

装
订
线

2 技术理论基础

2.1 离散小波变换

离散小波变换（DWT）在二维图像上的应用可以有效分离图像的高低频信息。一幅二维图像在经过离散小波变换后会形成四个长宽为原图一半的子图，得到三个高频子带（水平细节 LH，垂直细节 HL，对角细节 HH）和一个低频子带（近似结构 LL）。离散小波变换可对二维图像进行多次操作，图 2.1 是对二维图像施加一次离散小波变换后再对其 LL 子带做一次离散小波变换的示意图。

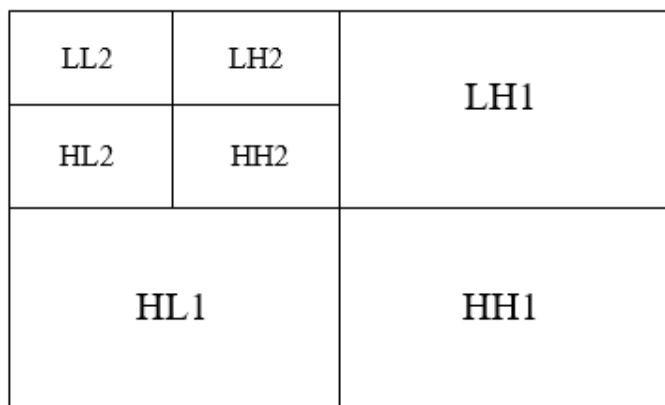


图 2.1 离散小波变换示意图

离散小波变换是基于某种特定的小波基而言的，小波基的选择对数字水印而言十分重要，不同的小波基带来的离散小波变换效果不同。本文选取的小波基为哈尔小波。哈尔小波是小波基中最简单的一种小波。基于哈尔小波的离散小波变换以及逆变换的算法复杂度小，提高了视频水印算法的效率。本文所采用的基于哈尔小波的离散小波变换函数可以表示为如下伪代码，其中 img 为原始二维图像矩阵， $dwted$ 是经过一级离散小波变换后的二维图像矩阵，两者的大小均为 $m \times n$ 。

算法 2.1

```

dwt(img[m][n],dcted[m][n]):
    inter[m][n]
    for i = 0 to m
        for j = 0 to n
            inter[i][j/2] = (img[i][j] + img[i][j+1])/2
            inter[i][j] = (img[i][j]-img[i,j+1])/2
            j += 2
        i += 1
    for j = 0 to n
        for i = 0 to m
            img[i/2][j] = (inter[i][j] + inter[i+1][j])/2
            img[i][j] = (inter[i][j]-inter[i+1,j])/2
            i += 2
        j += 1
    
```

2.2 奇异值分解

奇异值分解是一种将矩阵对角化的数值方法^[20]，奇异值代表了矩阵的形状特征。一个大小为 $m \times n$ 的矩阵至多有 $\min(m, n)$ 个奇异值。将图像表示为一个在实数域上 $m \times n$ 的矩阵 M ，则 M 可以表示为：

$$M = U\Sigma V^* \quad (2.1)$$

其中 U 和 V 是正交矩阵，大小分别为 $m \times m$ 与 $n \times n$ ，而 Σ 则是一个对角矩阵，其非对角线上的值都为 0，对角线上的值则为 M 的奇异值，且对角线上的值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\min(n, m)}$ 满足

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{\min(n, m)-1} \geq \lambda_{\min(n, m)} \geq 0 \quad (2.2)$$

矩阵的奇异值具有良好的稳定性。当载体受到攻击时，视频帧的奇异值能够保持相对稳定，对攻击的鲁棒性较强。另外在奇异值分解得到的对角矩阵中，对角线中越靠左上角的值越能反映矩阵的形状与特征，即便是舍去了后面几个特征值，也能很好地重构矩阵，这也使基于奇异值分解的水印拥有较好的鲁棒性。

基于奇异值分解的水印技术通常方法是水印的奇异值嵌入到载体中，因此在水印提取阶段需要提供奇异值矩阵两边的正交矩阵 U 和 V ，才能重构水印。将 U 和 V 以密钥的形式生成，能够有效地提高水印的安全性。另外，水印特征值的嵌入域通常也是载体的特征值，本文所用的嵌入方式可以表示为^[21]：

$$\lambda'_i = \lambda_i + \alpha \cdot \lambda_{wi} \quad (2.3)$$

其中 λ_i 表示载体嵌入水印前的第 i 个奇异值， λ'_i 是嵌入后的值， λ_{wi} 表示水印的第 i 个奇异值， α 代表水印嵌入的强度。在水印提取阶段，解析水印奇异值的公式可表示为：

$$\lambda_{wi} = \frac{\lambda'_i - \lambda_i}{\alpha} \quad (2.4)$$

其中 λ'_i 表示被嵌入水印后的载体的第 i 个奇异值， λ_i 表示原始载体的第 i 个奇异值， λ'_{wi} 是计算得到的水印的第 i 个奇异值。如公式所示，这种方法在水印提取阶段需要原始载体的奇异值参与。

2.3 离散余弦变换

离散余弦变换（DCT）将数字信号转化为频域信号。经过离散余弦变换得到的变换域将低频信息聚集在图像的左上角，因此也被常常用于压缩编码中，例如 JPEG、MPEG 以及 H.26x^[22]。当水印嵌入在离散余弦变换得到的变换域后，嵌入的水印信息会由离散余弦变换的逆变换分散到图像中，增强水印的不可见性和对部分几何攻击的鲁棒性。

2.4 规范化质心

规范化质心（NCG），亦或是标准化质心，是一种具有良好边界统计特征的统计量^[23]，规范化质心的强度 L 可以用于衡量图像的纹理复杂度。本文选用视频帧的规范化质心强度作为视频帧的复杂度进行关键帧选取并进行嵌入。规范化质心在能够较好地衡量纹理复杂度的同时保持了较

低的算法复杂度，是视频水印技术优良的选帧指标。一幅 $m \times n$ 的图像的规范化质心强度可由如下步骤得到：

（1）分别计算图像各行的平均值，得到一个由平均值构成的向量 Mx 。同理对各列求平均值得到列平均值向量 My 。

（2）规范化质心强度 L 由垂直方向的强度 Lx 和水平方向的强度 Ly 构成， Vx 由 $Vx(1,1)$ 和 $Vx(1,2)$ 两部分组成，其计算公式如下：

$$Vx(1,1) = \sum_{i=0}^{n-1} Mx(i) \times \cos\left(\frac{\pi}{n}\left(i * \frac{2\pi}{n}\right)\right) \quad (2.5)$$

$$Vx(1,2) = \sum_{i=0}^{n-1} Mx(i) \times \sin\left(\frac{\pi}{n}\left(i * \frac{2\pi}{n}\right)\right) \quad (2.6)$$

$$Lx = \sqrt{Vx(1,1)^2 + Vx(1,2)^2} \quad (2.7)$$

水平方向强度 Ly 同样由 $Vy(1,1)$ 和 $Vy(1,2)$ 组成，其计算公式与 $Vx(1,1)$ 和 $Vx(1,2)$ 同理，将公式（2,5）和（2,6）中的 Mx 替换为 My 即可。 Ly 的计算公式也与 Lx 的计算公式同理。

（3）得到垂直方向的强度 Lx 和水平方向的强度 Ly 后，通过以下公式得到最终的规范化质心强度 L ：

$$L = \sqrt{Lx^2 + Ly^2} \quad (2.8)$$

3 本文模型与算法

3.1 模型与算法概述

本文提出一种基于离散小波变换（DWT）和奇异值分解（SVD）的视频数字水印算法，采用滑动窗口和标准化质心强度进行选帧，每次从滑动窗口中选出标准化质心强度最大的帧进行嵌入。嵌入数据为水印奇异值，嵌入载体为经过二级离散小波变换和一级离散余弦变换的子图的奇异值，并在嵌入阶段产出存储了嵌入参数和水印奇异值分解得到的正交矩阵的密钥。在水印提取阶段同样采用滑动窗口和标准化质心强度选帧，单帧水印抽取采用嵌入算法的逆操作，并且在奇异值提取时加入纠正机制。对于提取到的多个水印，动态筛选出相互间相似度最高的若干水印进行平均后，结合密钥中存储的正交矩阵得到最终水印。

3.2 嵌入算法

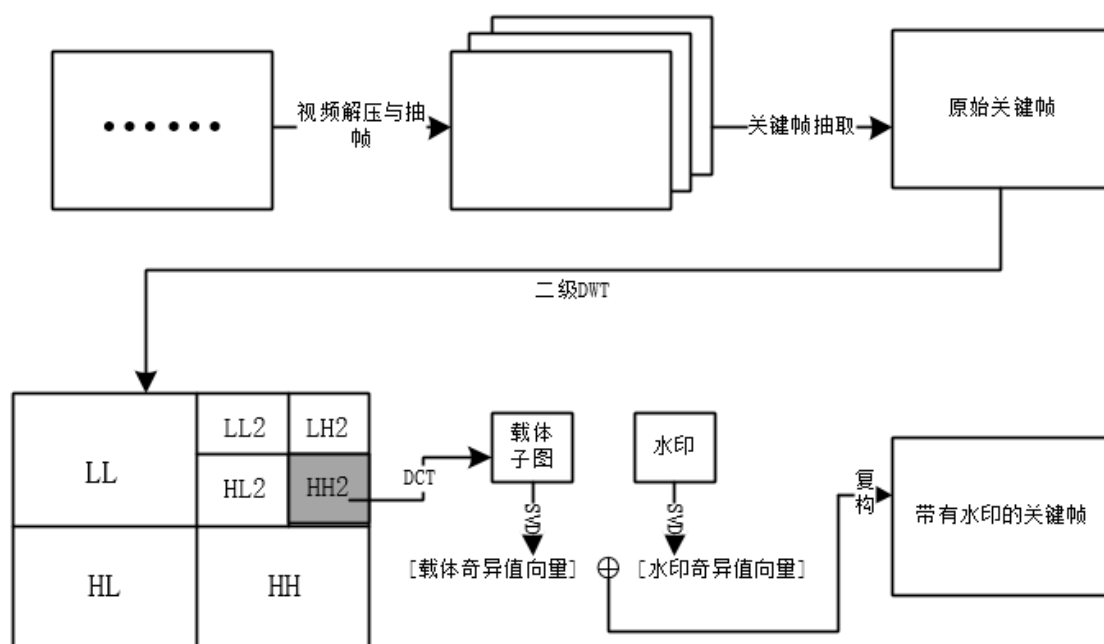


图 3.1 水印嵌入过程

本文提出的视频数字水印技术方案的嵌入方案如图 3.1，主要分为关键帧提取和单帧嵌入两个阶段。下面详细介绍两个阶段的步骤。

3.2.1 关键帧选择

本文的视频水印方案的关键帧选择策略结合了滑动窗口机制和规范化质心（NCG）强度计算，图 3.2 是该策略的示意图，其具体步骤为：

- (1) 设置窗口大小，初始时窗口最左侧处于视频的第二帧位置。
- (2) 计算窗口中所有帧的 NCG 强度大小，选择 NCG 强度最大的帧为关键帧进行嵌入。
- (3) 将窗口向右滑动整个窗口大小，若第(2)步选择的关键帧处于窗口位置末端，则窗口在原滑动距离上再加一帧。返回第(2)步，直到窗口左端到达视频帧序列末端。

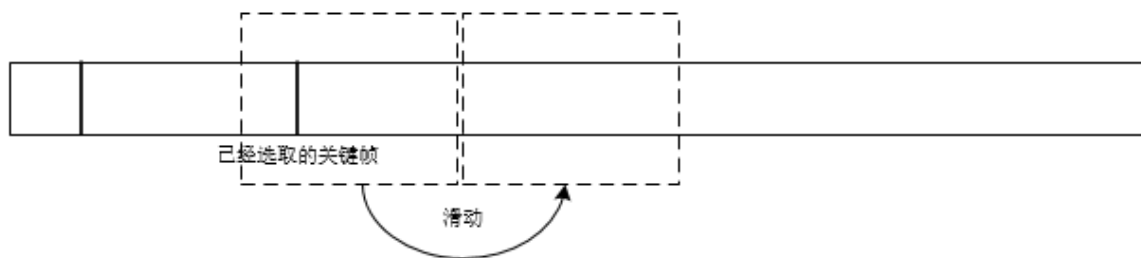


图 3.2 关键帧选取示意图

窗口机制使关键帧分散在整个视频中，且 NCG 强度计算的低复杂度保证了选帧的效率。由于水印提取阶段需要用关键帧的前一帧作为原始数据进行奇异值解析，故窗口开始位置在视频第二帧，且当窗口内选择出来的视频帧为末端时，窗口在原本的平移基础上需要再向后平移一帧。

3.2.1 单帧嵌入算法

本文提出的视频水印嵌入方案在单帧嵌入阶段的具体步骤为：

- (1) 将关键帧进行一级离散小波变换，抽取其 LH 水平细节子图再次进行一级离散小波变换后，抽取其 HH 对角细节子图进行离散余弦变换。
- (2) 提取(1)中经过一系列变换后的最终子图的奇异值向量 S ，将水印线性缩放到 $[0,1]$ 区间，提取水印的奇异值向量 S_w ，按照 S 与 S_w 的较小长度对较长的向量进行切割，并按以下公式进行嵌入，得到嵌入了水印信息的新奇异值向量 S' ：

$$S' = S + \alpha S_w \quad (3.1)$$

- (3) 若 S 在(2)进行了切割，则 S' 补上被切割的部分，重构子图，并将子图经过(1)中的逆变换得到带有水印的关键帧。

- (4) 当所有关键帧都完成嵌入后，将水印特征值提取过程中产生的两个正交矩阵，以及嵌入强度、窗口大小写入密钥。

3.3 提取算法

本文提出的水印技术在水印提取过程与嵌入过程不同的是，增加了对提取出的奇异值的校正和动态筛选水印的阶段，提取阶段的总示意图如图 3.3 所示。各个阶段的详细步骤如下。

3.3.1 关键帧选择

水印提取算法中关键帧的选择策略与嵌入算法一致，将窗口大小从密钥中读出即可按照嵌入

时的策略识别出关键帧。

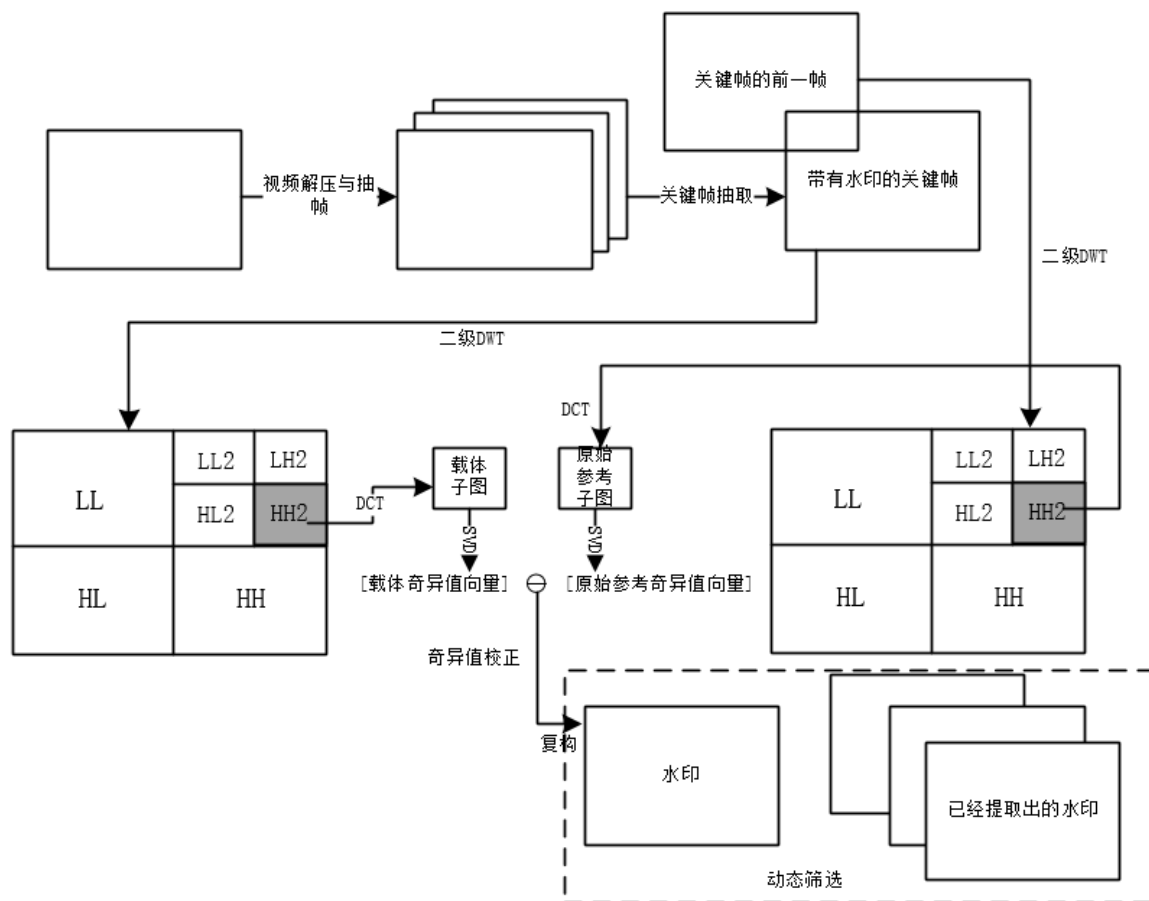


图 3.3 水印提取过程

3.3.2 单帧提取算法

水印的单帧提取具体步骤如下：

（1）将提取出的关键帧及其该关键帧的前一帧均施加与嵌入水印时相同的变换，即进行一级离散小波变换，抽取 LH 子图再进行一级离散小波变换，再抽取 HH 子图进行离散余弦变换。

（2）分别抽取（1）中得到的两个数据域的奇异值，得到关键帧子图的奇异值向量 S' 和关键帧前一帧的奇异值向量 S'_p 。按照以下公式提取出水印奇异值 S'_w ：

$$S'_w = \frac{S' - S'_p}{\alpha} \quad (3.2)$$

其中 α 是嵌入强度，通过密钥读取得到。

（3）对（2）中得到的 S'_w 进行修正：若 S'_w 的第一个值为负数，则将 S'_w 的所有值取反。这之后无论之前的第一个奇异值是否为负，均将 S'_w 的所有负值改为 0。

（4）将密钥中读取出来的两个正交矩阵和 S'_w 结合，并将得到的矩阵线性扩展至[0,255]区间

得到最终水印。

上述步骤中的第（3）步对解析得到的奇异值做了一定的修正，有以下两个原因：

（1）水印在嵌入载体后，或者带有水印的载体受到攻击之后，会影响视频帧的 NCG 强度。加上视频相邻帧间的信息相似度极高，NCG 强度也很相近，故在水印提取过程中选帧阶段可能选到关键帧的相邻帧。若在选帧过程中选到了关键帧的后一帧，则关键帧变为了该帧的前一帧，由公式（3.2）可得：

$$\frac{S'_p - S'}{\alpha} = -S'_w \quad (3.3)$$

意味着此时提取出的奇异值是水印奇异值的负数。若将该奇异值加以纠正，则可以提高算法的效率和命中率。由于奇异值向量中第一个值在理论上应最大且最能代表矩阵的特征，故当解析出的奇异值向量的第一个值为负数时，算法就认为该奇异值可能是由于抽取到了关键帧的后一帧而造成了奇异值为反，故对此取反进行修正。

（2）奇异值在理论上应该为非负数，故当奇异值向量经过修正后，还需要对负值取 0，这样可以提高解析出的水印的质量。

水印提取的单帧提取阶段运用了视频帧间数据相似度高这一特点，将关键帧的前一帧作为原始水印数据的近似，使水印的提取不再需要提供原始载体数据。需要注意的是，单帧提取到的水印并不是最终的水印结果，还需要经过动态筛选和求平均的阶段。

3.3.3 水印动态筛选

水印系统扫描视频帧序列，抽取关键帧并提取水印的过程中，会不断地累积水印。本文引入一种动态筛选算法，该算法在系统每次产生新水印后对当前已产生的水印进行一次评估，若算法认为正确的水印已经被提取出来，则立即停止视频扫描和水印提取，产生最终水印。动态筛选算法的本质是通过简单的聚类算法对于抽取出来的若干水印做真假判断。正确的水印间相似度高，在数据空间中聚集在一起，而由于随机性，错误水印的分布则较为分散。动态筛选方法在察觉到多个水印聚集时，便认为这些聚集在一起的水印是正确水印，而其余的水印是错误水印，需要筛掉。本文采用水印间 NC 值衡量这种水印间的相似度。

该算法需要引入最低有效水印数，最低有效 NC 值，最低置信因子三个参数，同时还引入每个水印都具备的置信因子、累加 NC 值两个属性，这两个属性对于所有水印来说初始值都为 0。当水印的置信因子达到最低置信因子时，该水印被视作可能的聚集团中的一员，记入有效水印数。当有效水印数达到最低有效水印数时，算法认为可以判定这些有效水印形成了聚集团，立即停止视频扫描与水印提取。记此时所有水印中最高的累加 NC 值为 max_sum_nc ，所有累加 NC 值超过 max_sum_nc 的 95% 的水印求平均后得到最终的水印结果。

每个水印的置信因子和累加 NC 值由以下步骤算得：

（1）每当有新的水印提取出来，一一计算该水印与之前已经提取出的水印的 NC 值，NC 值的计算公式已由公式（1.3）给出。

（2）NC 值大于等于最低有效 NC 值时，参与计算 NC 值的两个水印的置信因子加一，其累

加 NC 值加上当前计算得到的 NC 值。NC 值小于最低有效 NC 值时，回到（1）计算与下一个水印间的 NC 值，直到全部计算完毕。

（3）当 NC 值全部计算完毕后，统计目前的有效水印是否达到最低有效水印数，若达到则停止扫描视频以及水印提取，产出最终结果。

（4）当最后一个水印计算完毕后，若当前的有效水印数仍然没有达到最低有效水印数，也同样进入最后的水印产出。但拥有 max_sum_nc 的水印的置信因子必须超过 1，否则认为水印提取失败。

动态筛选算法不仅通过多水印统计规避由于关键帧不命中而带来的毁灭式打击，使系统有较强的容错力，还能避免系统大量提取重复水印，使算法的效率得到提高。

装
订
线

4 实验部分

4.1 实验样本与参数

本次实验选用 4 个题材不同的视频进行水印嵌入，其信息由表 4.1 给出：

表 4.1 实验样本信息

样本编号	题材	分辨率	时长（s）	帧率（fps）	通道数	位深度	编码
1	森林航拍	640 × 360	7.594	23.976	3	8	MPEG-4
2	动画	1280 × 720	8.600	25.000	3	8	MPEG-4
3	化学实验	1920 × 1080	3.840	25.000	3	8	MPEG-4
4	多场景新闻	576 × 432	11.160	25.000	3	8	MPEG-4

需要注意的是，本次实验为了模拟真实场景，在系统在完成水印嵌入后，会将视频数据以载体原编码导出，提取水印时需要重新解码带有水印的视频。因此本次实验的所有含有水印的载体都经过了一次 MPEG-4 编码，相当于遭受了一次压缩攻击。

本次实验选用的水印是 64×64 的灰度 Lena 图，如图 4.1：



图 4.1 实验所用水印

本次实验的参数由表 4.2 给出：

表 4.2 实验参数信息

参数名称	参数值
窗口大小	10
嵌入强度	5
最低有效水印数	5
最低置信因子	5
最低有效 NC 值	0.80

其中最低有效水印数，最低置信因子，最低有效 NC 值是在水印提取时动态筛选所用。

4.1 透明性测试

本文实验为了模拟真实场景，在视频嵌入水印或遭受攻击后，均使用视频原编码方式导出为新的视频。故所有的载体在提取水印前都可视作遭受了一次 MPEG-4 攻击。图 4.2 给出了水印在不同样本中关键帧嵌入前后的峰值信噪比。每个样本均包含三条线：嵌入强度为 5 的视频在关键帧上对于原始视频的 PSNR 值（蓝线），嵌入强度为 0 的视频对原始水印的 PSNR 值（橙线），以及嵌入强度为 5 的视频对嵌入强度为 0 的视频的 PSNR 值（灰线）。

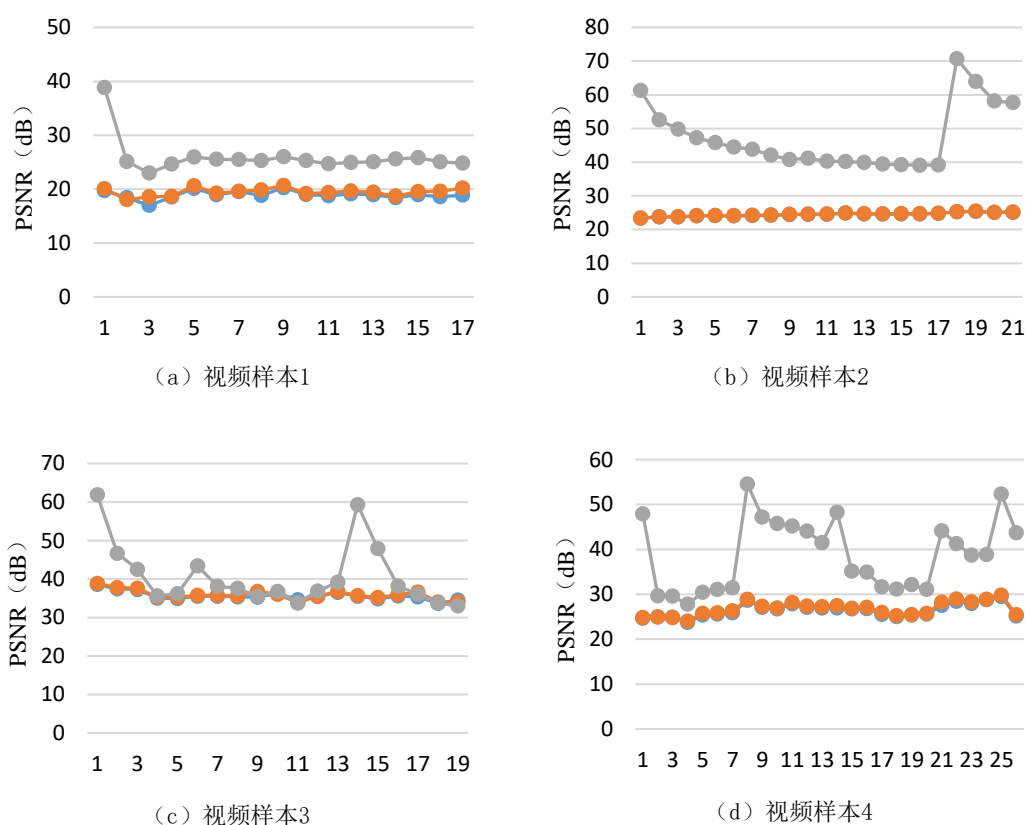


图 4.2 各样本视频关键帧上 PSNR 值

PSNR 值越高，表示图像失真度越低，一般认为当 PSNR 值超过 35dB 时水印的透明性较好。如图 4.2 所示，嵌入强度为 0 和 5 的视频对于原始视频的 PSNR 值十分接近。除了样本 1，其它样本在嵌入强度为 5 的视频对嵌入强度为 0 的视频上的 PSNR 维持较高水平，失真度较低。样本 1 对嵌入强度为 0 的视频的 PSNR 值维持在 25dB 左右，其失真度也属于可接受范围。

4.2 鲁棒性测试

鲁棒性是视频数字水印性能的重要体现，业内普遍使用 NC 值衡量灰度水印的鲁棒性，用嵌入帧对原始帧的平均 PSNR 值表示视频所受的攻击程度。PSNR 值越低，视频所受的攻击强度越大。水印在图像攻击下的鲁棒性性能如表 4.3 所示，其中高斯滤波的均值为 0，标准差为 0.3。NC 值处为“-”表示没有检测出水印。表中将每一种攻击下表现最好的样本用红色标出，表现最差加粗

标出。

表 4.3 水印在图像攻击下的鲁棒性表现

攻击种类	样本 1		样本 2		样本 3		样本 4	
	NC	PSNR	NC	PSNR	NC	PSNR	NC	PSNR
无攻击	0.992	18.943	0.99	24.469	0.991	35.677	0.993	26.486
高斯噪声 0.003	0.992	13.797	0.992	16.81	0.989	22.952	0.989	18.444
高斯噪声 0.005	0.992	13.739	0.993	16.735	0.989	23.091	0.988	18.256
高斯噪声 0.01	0.993	13.374	0.988	16.488	0.99	22.246	0.987	17.77
高斯噪声 0.05	0.991	10.268	0.954	12.205	0.981	16.451	0.986	11.892
高斯噪声 0.1	0.964	7.142	0.964	8.098	0.965	9.714	0.949	7.38
椒盐噪声 0.003	0.99	12.091	0.97	16.576	0.97	22.577	0.984	16.003
椒盐噪声 0.01	0.983	8.872	0.983	10.927	0.959	17.462	0.989	10.89
椒盐噪声 0.05	0.965	6.442	0.96	7.588	0.96	9.656	0.96	6.844
椒盐噪声 0.1	0.965	4.648	0.967	5.087	0.962	6.143	0.969	4.738
椒盐噪声 0.2	0.965	2.969	0.963	2.903	0.962	3.604	0.976	3.03
均值滤波 3×3	0.991	12.91	0.988	15.745	0.991	21.991	0.949	12.485
均值滤波 5×5	0.985	11.11	0.973	14.351	0.989	20.77	0.949	10.605
均值滤波 7×7	-	10.101	0.97	13.128	0.96	19.761	0.945	9.388
高斯滤波 3×3	0.994	14.057	0.981	16.341	0.988	22.864	0.985	15.427
高斯滤波 5×5	0.993	13.705	0.984	15.838	0.989	22.626	0.975	14.433
高斯滤波 7×7	0.988	13.063	0.993	15.148	0.992	22.395	0.961	13.57
中值滤波 3×3	0.994	13.26	0.994	16.068	0.989	22.359	0.991	14.67
中值滤波 5×5	0.981	11.903	0.993	14.924	0.975	21.604	0.955	12.763
中值滤波 7×7	0.978	10.863	0.991	13.819	0.981	20.898	0.963	11.655
JPEG 压缩 10	0.993	8.147	0.976	8.582	0.972	12.906	0.986	7.842
JPEG 压缩 20	0.996	10.372	0.983	12.193	0.993	17.92	0.989	10.416
JPEG 压缩 30	0.995	11.54	0.989	13.815	0.991	21.006	0.99	11.813
剪切左上 12.5%	0.992	10.378	0.99	12.146	0.989	14.502	0.985	13.434
剪切中心 12.5%	0.997	10.576	0.982	12.057	0.99	14.397	0.981	13.314
剪切右下 12.5%	0.993	10.63	0.984	12.192	0.989	14.61	0.985	13.911
剪切中心 20%	0.984	9.107	0.99	10.058	0.989	11.761	0.983	11.245

由表 4.3 可得，虽然水印在各种图像攻击下的表现参差不齐，但整体维持了较高水平，除样本 1 在 7×7 均值滤波下检测失败，其余的 NC 值绝大多数都在 0.95 以上，水印对图像攻击的鲁棒性较高。水印的鲁棒性与载体也有一定关系，样本一中水印的鲁棒性整体好于其它三个样本，

但是样本一在 7×7 均值滤波下出现了测试中唯一一个检测失败案例。另外，水印对高斯噪声、局部剪切、JPEG 压缩方面的整体表现较为突出，而对于均值滤波和椒盐噪声的表现则略低，部分原因是椒盐噪声攻击下视频的 PSNR 值明显低于其它攻击，表示椒盐噪声对视频的破坏程度较大。表 4.4 给出本文水印算法在图像攻击的水印 NC 值与文献[18]的对比，每组攻击中表现最差的值加粗表示。

表 4.4 水印在图像攻击下的鲁棒性与文献[18]对比

攻击种类	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	文献[18]
高斯噪声 0.003	0.992	0.992	0.989	0.989	0.9286
高斯噪声 0.005	0.992	0.993	0.989	0.988	0.9205
椒盐噪声 0.003	0.99	0.97	0.97	0.984	0.9765
中值滤波 3×3	0.994	0.994	0.989	0.991	0.9353
JPEG 压缩 10	0.993	0.976	0.972	0.986	0.9528
JPEG 压缩 30	0.995	0.989	0.991	0.99	0.9483
剪切中心 20%	0.984	0.99	0.989	0.983	0.9078

表 4.4 显示除了椒盐噪声 0.003 外，本文算法在四个样本上的鲁棒性均高于文献[18]。

除图像攻击外，本实验还测试了水印在针对视频特有的帧丢失（表 4.5）和剪辑攻击下的水印的鲁棒性（表 4.6）。剪辑攻击是将载体裁剪得到一个片段的攻击。由于帧丢失攻击的随机性较强，每种比率的随机帧丢失攻击实验重复三次，每种比率的帧攻击下表现最差的值加粗标出。

表 4.5 水印在帧丢失下的鲁棒性表现

帧丢失参数	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4
帧丢失 10%-1	0.993	0.992	0.991	0.987
帧丢失 10%-2	0.991	0.992	0.99	0.987
帧丢失 10%-3	0.993	0.99	0.989	0.986
帧丢失 20%-1	0.981	0.99	0.988	0.986
帧丢失 20%-2	0.993	0.987	0.991	0.985
帧丢失 20%-3	0.992	0.988	0.985	0.982
帧丢失 30%-1	0.993	0.989	0.988	0.984
帧丢失 30%-2	0.993	0.989	0.988	0.984
帧丢失 30%-3	0.991	0.99	0.989	0.976

表 4.5 中除了 4 号样本在帧丢失 30%的情况下 NC 值为 0.976 以及在某几次实验中，其它的 NC 值均超过 0.98，大部分超过 0.985，表明水印对帧丢失攻击的鲁棒性较强。

表 4.6 水印在剪辑攻击下的鲁棒性表现

剪辑参数	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4
30%长度的视频	-	0.991	0.985	0.983
50%长度的视频	0.991	0.987	0.99	0.982

表 4.6 中，样本一再次出现了整个实验唯二的水印检测失败，由后面的表 4.8 可知该检测失败的案例是由选帧命中率为 0 引起的。除此之外其它的样本对剪辑攻击的鲁棒性表现良好，NC 值均超过了 0.98。

此外，图 4.3 提取出样本 2 与样本 3 的水印对于原始水印的 NC 和 PSNR 值，并进行多项式拟合，发现随着 NC 值的上升，PSNR 的值上涨得越快，也就是说即便是两个接近的 NC 值，其提取出来的水印图像的感观差距也可能较大。图 4.4 给出了实验过程中提取出来的不同 NC 值的水印图像。由图 4.4 可以看出，NC 等于 0.982 的水印和 NC 等于 0.983 的水印在感观上差距较大，即便是 NC 值同等于 0.991 的两张水印，样本 3 提取出的水印看起来比样本 2 清晰很多。

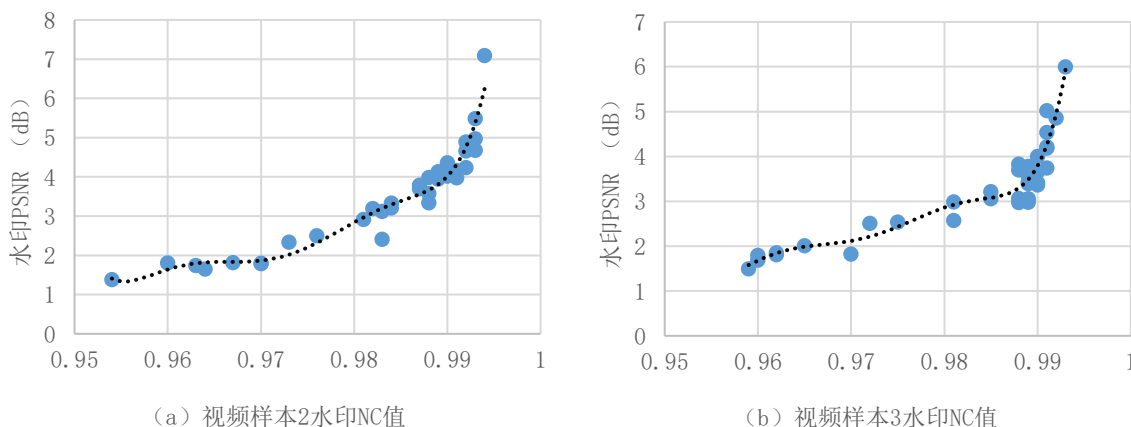


图 4.3 水印 NC 值与 PSNR 值间的关系

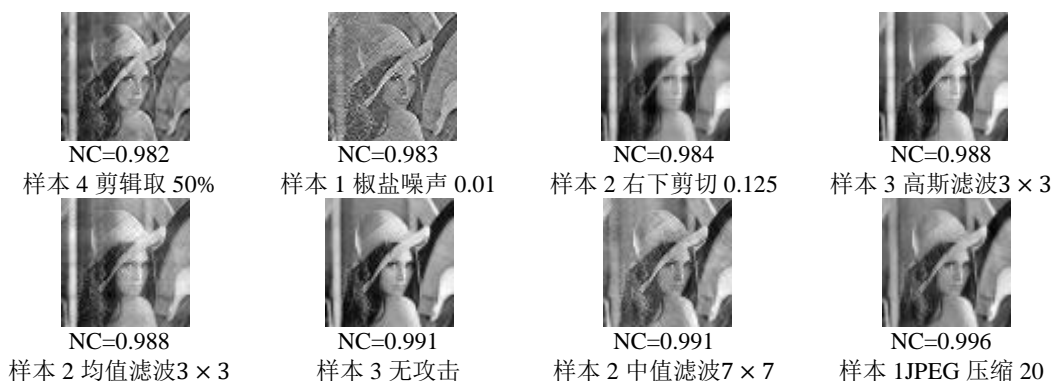


图 4.4 不同 NC 值的水印图像

4.3 设计评估

本文提出的视频数字水印算法有三点创新设计：

- （1）以关键帧的前一帧替代关键帧嵌入水印前的原始图像。
- （2）在水印提取阶段，对解析到的奇异值进行修正。
- （3）引入动态筛选算法，动态筛选与聚合视频提取出的水印。

为评估上述设计对于系统性能的贡献，本节开展实验进行验证，每个实验的设计和结果如下。

4.3.1 前帧替代

为评估前帧替代原始数据对水印质量的影响，本节在鲁棒性实验基础上，增设一组对比实验，该对比实验使用视频的原始图像辅助水印的提取过程。本次实验结果由表 4.7 给出。表 4.7 展示了使用前帧替代下的水印质量、使用原始数据下的水印质量、原始数据与前帧替代下水印质量的差值。差值为正时表示使用原始视频数据表现更好，用红色加粗标出。为了减少冗余数据的展示，样本 1 给出上述三个数据，样本 2、3、4 只给出差值。

表 4.7 前帧替代与原始数据比较

攻击方式	样本 1		样本 2		样本 3	样本 4
	前帧	原始	原始-前帧	原始-前帧	原始-前帧	原始-前帧
无攻击	0.992	0.992	0	-0.003	-0.002	-0.005
高斯噪声 0.003	0.992	0.989	-0.003	-0.002	-0.002	-0.022
高斯噪声 0.005	0.992	0.991	-0.001	-0.004	-0.001	-0.017
高斯噪声 0.01	0.993	0.993	0	0.003	0.004	-0.026
高斯噪声 0.05	0.991	0.968	-0.023	0.011	-0.016	-0.04
高斯噪声 0.1	0.964	0.966	0.002	-0.001	-0.003	-0.004
椒盐噪声 0.003	0.99	0.97	-0.02	-0.006	-0.007	-0.035
椒盐噪声 0.01	0.983	0.968	-0.015	-0.02	0.003	-0.042
椒盐噪声 0.05	0.965	0.968	0.003	0.004	0.002	-0.009
椒盐噪声 0.1	0.965	0.967	0.002	-0.004	0	-0.014
椒盐噪声 0.2	0.965	0.967	0.002	0	0	-0.018
均值滤波 3×3	0.991	0.969	-0.022	-0.022	-0.026	0.04
均值滤波 5×5	0.985	0.97	-0.015	-0.004	-0.02	0.04
均值滤波 7×7	-	0.971	0.971	-0.001	0.009	0.044
高斯滤波 3×3	0.994	0.923	-0.071	-0.054	-0.064	0.003
高斯滤波 5×5	0.993	0.969	-0.024	-0.061	-0.066	0.014
高斯滤波 7×7	0.988	0.97	-0.018	-0.025	-0.024	0.028
中值滤波 3×3	0.994	0.968	-0.026	-0.038	-0.066	-0.004
中值滤波 5×5	0.981	0.97	-0.011	-0.029	-0.007	0.034

续表 4.7

攻击方式	样本 1		样本 2		样本 3	样本 4
	前帧	原始	原始-前帧	原始-前帧	原始-前帧	原始-前帧
中值滤波 7×7	0.978	0.97	-0.008	-0.026	-0.013	0.026
JPEG 压缩 10	0.993	0.97	-0.023	-0.047	-0.021	-0.063
JPEG 压缩 20	0.996	0.967	-0.029	-0.011	-0.015	-0.029
JPEG 压缩 30	0.995	0.971	-0.024	-0.01	-0.013	-0.027
剪切左上 12.5%	0.992	0.952	-0.04	-0.002	0.007	-0.032
剪切中心 12.5%	0.997	0.967	-0.03	-0.001	-0.003	-0.04
剪切右下 12.5%	0.993	0.982	-0.011	0	0.003	0.001
剪切中心 20%	0.984	0.964	-0.02	-0.007	-0.007	-0.041

由表 4.7 可得，大多数情况下使用前帧代替关键帧原始数据要比使用原始数据更好。本文使用的前帧替代的算法不仅可行，还增强了水印的鲁棒性。可能的原因有二：

（1）本文所有的实验所用的样本在嵌入水印以及遭受攻击后，均以原编码方式导出，水印提取时都是在载体经过一次压缩后进行的，故原始视频数据可能与经过多次解码再编码的视频信息相差较大。

（2）相邻帧由于在视频编码和遭受攻击时与关键帧经受了同等规模的篡改，在奇异值解析阶段的减法操作中，这种相同规模的篡改反而被抵消了，使得解析到的奇异值更接近原始奇异值。

4.3.2 奇异值校正

本文的水印算法在水印提取阶段对奇异值进行校正，以充分利用可能抽取到的关键帧的后一帧。奇异值校正对于系统性能的贡献直接体现于水印提取阶段命中关键帧后帧的概率。本节对鲁棒性测试中关键帧和后帧的总命中率、后帧在总命中帧中的占比进行了统计。需要注意的是，为了避免实验参数不同带来的实验结果的片面性，本节中统计的总命中率和后帧占比均是扫描所有视频帧后统计而得的，动态筛选机制不参与本次实验。本次实验的实验结果由表 4.8 给出。

表 4.8 总命中率与后帧占总命中帧之比

攻击方式	样本 1		样本 2		样本 3		样本 4	
	总命中 率	后帧占比	总命中 率	后帧占比	总命中 率	后帧占比	总命中 率	后帧占 比
无攻击	1	0.412	0.81	0.059	1	0	0.885	0
高斯噪声 0.003	0.941	0.375	0.619	0.078	1	0	0.63	0
高斯噪声 0.005	1	0.235	0.81	0	1	0	0.667	0.055
高斯噪声 0.01	0.941	0.25	0.81	0	1	0	0.593	0
高斯噪声 0.05	0.588	0.5	0.572	0.084	1	0	0.704	0.105
高斯噪声 0.1	0.529	0.556	0.429	0.112	1	0.053	0.629	0.235

续表 4.8

攻击方式	样本 1		样本 2		样本 3		样本 4	
	总命中 率	后帧占比	总命中率	后帧占比	总命中 率	后帧占比	总命中 率	后帧占 比
椒盐噪声 0.003	0.706	0.584	0.524	0	1	0.053	0.778	0.19
椒盐噪声 0.01	0.765	0.384	0.619	0	1	0	0.592	0.5
椒盐噪声 0.05	0.167	0.665	0.571	0.166	0.895	0	0.555	0.2
椒盐噪声 0.1	0.235	0.749	0.428	0.222	0.842	0	0.593	0.125
椒盐噪声 0.2	0.118	1	0.429	0	0.842	0.063	0.518	0.143
均值滤波 3×3	1	0.471	0.81	0.059	1	0	0.923	0.041
均值滤波 5×5	0.882	0.333	0.81	0.059	1	0	0.923	0.041
均值滤波 7×7	0.882	0.333	0.81	0.059	1	0	0.63	0.117
高斯滤波 3×3	1	0.235	0.81	0.059	1	0	0.885	0.087
高斯滤波 5×5	1	0.412	0.81	0.059	1	0	0.884	0.043
高斯滤波 7×7	0.941	0.312	0.81	0.059	1	0	0.923	0.041
中值滤波 3×3	0.883	0.533	0.81	0.059	1	0	0.846	0.273
中值滤波 5×5	0.882	0.4	0.81	0.059	1	0	0.769	0.45
中值滤波 7×7	0.882	0.2	0.81	0.059	1	0	0.731	0.316
JPEG 压缩 10	0.611	0.182	1	0	1	0	0.63	0.176
JPEG 压缩 20	0.882	0.333	0.858	0.056	1	0	0.815	0.091
JPEG 压缩 30	0.941	0.438	0.858	0.056	1	0	0.847	0.455
剪切左上 12.5%	0.588	1	0.477	0.101	0.474	0.112	0.333	0.111
剪切中心 12.5%	0.235	0	0.238	0.399	0.667	0.084	0.23	0.5
剪切右下 12.5%	0.611	0.637	0.381	0	0.526	0.2	0.461	0.416
剪切中心 20%	0.235	0	0.238	0.399	0.389	0.144	0.222	0.5
帧丢失 10%-1	0.251	0.251	0.421	0.249	0.529	0.444	0.5	0.25
帧丢失 10%-2	0.267	0.251	0.421	0.126	0.611	0.363	0.478	0.182
帧丢失 10%-3	0.333	0.601	0.55	0.182	0.722	0.307	0.52	0.154
帧丢失 20%-1	0.214	0.668	0.647	0.363	0.6	0.222	0.476	0.2
帧丢失 20%-2	0.429	0.333	0.438	0.285	0.467	0.143	0.455	0
帧丢失 20%-3	0.428	0.5	0.412	0	0.6	0.445	0.476	0.2
帧丢失 30%-1	0.231	0.333	0.467	0.143	0.429	0.333	0.421	0
帧丢失 30%-2	0.231	0.667	0.501	0.126	0.616	0.375	0.4	0.375
帧丢失 30%-3	0.273	0.333	0.333	0	0.5	0.5	0.389	0.571
30%长度的视频	0	-	0.333	0	0.334	0.5	0.5	0
50%长度的视频	0.889	0.125	0.273	0	0.4	0	0.5	0.572

由表 4.8 可得，在大多数情况下水印提取的帧中会存在后帧，这也使奇异值校正算法充分发挥了作用。样本 1 在椒盐噪声 0.2 和剪切左上 12.5%攻击下，后帧占比达到了 1。而由表 4.4 可得样本 1 在这两种攻击下的 NC 值分别为 0.965 和 0.992，说明奇异值校正算法发挥了作用，挽救了可能发生的水印提取灾难，提高了水印的鲁棒性和系统的容错能力。

4.3.3 动态筛选

本文的水印算法引入动态筛选机制，其本质是一种简单的聚类算法，每当有新的水印生成时，系统便会当前水印进行一次统计，评估当前水印质量，若达到要求则停止提取水印，筛除劣质水印，产出最终结果。

表 4.8 已经暴露出系统在水印提取阶段的帧命中率的不确定性，但由表 4.4 可得水印的整体鲁棒性较好，说明动态筛选机制有效地筛除了由于帧提取错误而解析到的劣质水印。样本 1 的在 9 组帧丢失攻击下的帧命中率都小于 0.5，其中有 6 组小于 0.3，而由表 4.5 得到样本 1 在帧攻击下的 NC 值有 8 组都超过了 0.99，另外一组也超过了 0.98。水印系统在低命中率下仍然能够产出高质量的水印，动态筛选大大增加了水印系统的抽帧的容错力。

本节的实验侧重于评估动态筛选算法对于水印提取效率的贡献，该贡献直接体现在水印提取阶段实际抽帧数占扫描整个视频后抽帧数的比例，表 4.9 给出了本次实验的实验结果。

表 4.9 实际抽帧数及其占比

攻击方式	样本 1		样本 2		样本 3		样本 4	
	实际抽帧	占比	实际抽帧	占比	实际抽帧	占比	实际抽帧	占比
无攻击	6	0.353	7	0.333	6	0.316	7	0.269
高斯噪声 0.003	6	0.353	8	0.381	6	0.316	6	0.222
高斯噪声 0.005	6	0.353	7	0.333	6	0.316	6	0.222
高斯噪声 0.01	6	0.353	7	0.333	6	0.316	6	0.222
高斯噪声 0.05	6	0.353	9	0.429	6	0.316	8	0.296
高斯噪声 0.1	8	0.471	10	0.476	11	0.579	12	0.444
椒盐噪声 0.003	6	0.353	7	0.333	6	0.316	7	0.259
椒盐噪声 0.01	9	0.529	8	0.381	11	0.579	15	0.556
椒盐噪声 0.05	10	0.556	10	0.476	11	0.579	14	0.519
椒盐噪声 0.1	17	1	21	1	11	0.579	15	0.556
椒盐噪声 0.2	17	1	9	0.429	14	0.737	26	0.963
均值滤波 3×3	6	0.353	8	0.381	6	0.316	26	1
均值滤波 5×5	17	1	21	1	9	0.474	26	1
均值滤波 7×7	17	1	21	1	8	0.421	27	1
高斯滤波 3×3	6	0.353	7	0.333	6	0.316	7	0.269
高斯滤波 5×5	6	0.353	7	0.333	6	0.316	18	0.692
高斯滤波 7×7	17	1	7	0.333	6	0.316	26	1

续表 4.9

攻击方式	样本 1		样本 2		样本 3		样本 4	
	实际抽帧	占比	实际抽帧	占比	实际抽帧	占比	实际抽帧	占比
中值滤波 3×3	6	0.353	8	0.381	6	0.316	7	0.269
中值滤波 5×5	17	1	13	0.619	19	1	26	1
中值滤波 7×7	17	1	21	1	19	1	26	1
JPEG 压缩 10	18	1	7	0.333	6	0.316	6	0.222
JPEG 压缩 20	7	0.412	7	0.333	6	0.316	7	0.259
JPEG 压缩 30	6	0.353	7	0.333	6	0.316	6	0.231
剪切左上 12.5%	6	0.353	14	0.667	8	0.421	7	0.259
剪切中心 12.5%	15	0.882	21	1	7	0.389	21	0.808
剪切右下 12.5%	6	0.333	9	0.429	10	0.526	8	0.308
剪切中心 20%	15	0.882	21	1	15	0.833	18	0.667
帧丢失 10%-1	15	0.938	18	0.947	8	0.471	6	0.25
帧丢失 10%-2	15	1	13	0.684	7	0.389	9	0.391
帧丢失 10%-3	14	0.933	10	0.5	7	0.389	6	0.24
帧丢失 20%-1	14	1	8	0.471	8	0.533	8	0.381
帧丢失 20%-2	9	0.643	11	0.688	8	0.533	9	0.409
帧丢失 20%-3	13	0.929	12	0.706	10	0.667	12	0.571
帧丢失 30%-1	13	1	12	0.8	9	0.643	9	0.474
帧丢失 30%-2	13	1	11	0.688	9	0.692	8	0.4
帧丢失 30%-3	11	1	15	1	9	0.75	14	0.778
30%长度的视频	4	1	6	1	6	1	8	1
50%长度的视频	6	0.667	11	1	10	1	11	0.786

由表 4.9 可得，在 148 组数据中，仅有 34 组实际抽帧占比达到 100%，即大多数情况下水印提取并不需要扫描整个视频，动态筛选算法有效地提高了水印提取算法的效率。

5 总结和展望

5.1 总结

本文在对视频数字水印技术进行充分调研后，系统地介绍了视频数字水印技术的意义、基本模型、分类、攻击类型、性能指标，并总结了相关视频水印技术的研究现状，基于离散小波变换和奇异值分解法研究并实现了一种支持动态筛选的视频数字水印方案，该方案的创新点如下：

（1）使用滑动窗口机制对视频选取关键帧，使嵌入有水印的关键帧分散至整个视频，加强了水印对于剪辑攻击的鲁棒性。

（2）利用视频相邻帧间相似度高的特点，以关键帧的前一帧替代关键帧嵌入水印前的原始数据，使水印提取不再依靠原始载体。

（3）在水印提取阶段解析得到奇异值后对其进行修正，使关键帧的后帧也具有解析水印的能力，提高了水印提取阶段抽帧的命中率以及水印提取效率。

（4）引入动态筛选算法，避免在水印提取阶段因为抽帧错误而生成错误的水印，同时也避免了系统不断地提取重复信息，增大了水印提取的效率。

本文在提出水印方案并实现后，对水印系统进行了大量实验，最终结果表明本文提出的视频水印方案具有良好的透明性和鲁棒性，系统设计的各个部分有效地提升了水印鲁棒性以及系统的容错力和效率。

5.2 展望

尽管本文尽心设计水印方案并进行大量实验进行评估，但由于针对视频的攻击多样而繁杂，没有任何一种水印方案能做到在各个性能指标上都表现突出。本文虽在视频水印技术上做了一定的工作，但是仍然需要不断地探索、研究和深入：

（1）本文提出的水印算法还有待更多种类的攻击的检验，并且由于本文算法使用相邻两帧进行水印提取，故当载体遭遇帧平均等共谋攻击时，水印信息将平均分散到相邻两帧上，导致无法提取。此外本文的实验已经暴露了水印在例如椒盐噪声和均值滤波攻击下鲁棒性较差，今后的工作也应着重提升水印的短板，不断通过实验排查缺漏。

（2）水印算法的漏检和误检标准应进一步做设计，并通过实验给出相关指标的值。

（3）虽然文中的算法不需要依靠原始载体信息进行水印提取，但是仍然需要部分原始水印信息，如何做到全盲提取也是本文算法有待改进的地方之一。

（4）算法中涉及到的参数较多，实验也表现出算法性能指标在各个样本间的不稳定性，在今后的研究中可以尝试建立根据载体和水印信息形成自适应参数的系统。此外，本文使用了 4 个不同的载体样本，但是水印只使用了一种，今后的实验可以研究水印种类的不同对于系统性能的影响。

（5）本文在对设计评估实验进行分析时，提出了多个猜想对实验结果做出解释，未来的工作可以进一步挖掘求证这些猜想。

（6）表 4.8 给出的水印提取阶段帧命中率的统计数据暴露出以 NCG 强度作为选帧指标的方

法存在不稳定的情况，可以考虑采用其它更加稳定的指标选帧。

装

订

线

参考文献

- [1] 高鹏. 鲁棒视频水印算法的相关研究[D].杭州电子科技大学,2018.
- [2] 张江,赵黎,杨士强.视频水印技术综述[J].计算机应用,2005(04):850-852.
- [3] 周利军,周源华.数字图像水印的扩频实现[J].红外与激光工程,2000(05):27-31.
- [4] 陈玉麟. 基于奇异值分解的视频水印算法研究[D].安徽大学,2015.
- [5] 田叶. 鲁棒性视频水印算法研究[D].天津大学,2018.
- [6] 曾琳玲. 基于图像置乱及 DWT_SVD 的数字图像水印算法研究[D].吉首大学,2017.
- [7] 姜孟杉. 鲁棒数字视频水印技术研究[D].电子科技大学,2019.
- [8] 马强. 基于离散小波变换的彩色图像数字水印研究[D].西北农林科技大学,2013.
- [9] 包宋建,杨守良.DWT-Schur 结合的全盲数字视频水印算法[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(10):136-141.
- [10] 熊祥光,王力,王端理.基于提升小波变换和 DCT 的彩色视频水印算法[J].计算机应用研究,2013,30(04):1191-1193+1197.
- [11] 刘绍辉,韩路,姚鸿勋.抗共谋攻击的视频水印算法[J].通信学报,2010,31(01):14-19.
- [12] 高振宇,杨晓梅,龚剑明,金海.图像复杂度描述方法研究[J].中国图象图形学报,2010,15(01):129-135.
- [13] 周支元,杨高波.一种基于 DCT 和 NCG 的数字视频水印算法[J].计算技术与自动化,2007(03):86-91.
- [14] 吴静丽,马建斌,沈年凤,张文明.基于视频关键帧的水印嵌入算法研究[J].电脑知识与技术,2010,6(22):6328-6330.
- [15] 李弋星,刘士荣,仲朝亮,王坚.基于改进关键帧选择的 RGB-D SLAM 算法[J].大连理工大学学报,2017,57(04):411-417.
- [16] Ochoa, H., Rao, K.R.. A low bit-rate hybrid DWT-SVD image-coding system (HDWTSVD) for monochromatic images[P]. Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium on,2003.
- [17] 毕洪波,张玉波.基于 DWT-SVD 的视频水印[J].科学技术与工程,2010,10(33):8295-8298.
- [18] 李新宇,陈阳.基于 DWT_SVD 的盲检测鲁棒视频水印算法[J].计算机技术与发展,2018,28(09):123-126.
- [19] Tanya Koohpayeh Araghi,Azizah Abd Manaf. An enhanced hybrid image watermarking scheme for security of medical and non-medical images based on DWT and 2-D SVD[J]. Future Generation Computer Systems,2019,101.
- [20] 杨俊,张贵仓,魏伟一.基于小波变换和奇异值分解的数字水印算法[J].长春理工大学学报,2005(04):81-84.
- [21] Handito K W, Fauzi Z, Ma'ruf F A, et al. The comparison between SVD-DCT and SVD-DWT digital image watermarking[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018, 971(1):

012006.

[22] Asikuzzaman M, Pickering M R. An overview of digital video watermarking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 28(9): 2131-2153.

[23] 杨高波. 一种基于 NCG 和 SVD 的视频水印算法[C]. 中国图象图形学学会.第十四届全国图象图形学学术会议论文集.中国图象图形学学会:中国图象图形学学会,2008:164-168.

装

订

线

谢辞

值本文完成之际，感谢田春岐老师和钟计东老师对本文的指导与帮助，在此向两位老师致以最崇高的敬意。感谢汪涵与贡畅同学对我的帮助与支持，感谢谢宸琥、谢宇辉、叶子恒三位同学对我的鼓励。衷心地感谢一路上所有帮助我、关爱我的人。