

基于 MPEG 压缩域的视频数字水印 算法的研究与实现

叶 绿

(浙江科技学院 计算机与电子工程学系,浙江 杭州 310023)

摘 要: 根据 MPEG 压缩视频的原理,提出了一种基于 MPEG 压缩域面向 DCT 变换的视频数字水印算法,并详细叙述了将水印信息经 m 序列调制后嵌入到 IVOP 帧的色度 DCT 变换的直流系数中的视频数字水印算法设计和实现的过程。实验证明,该视频数字水印算法在不降低视频质量的基础上,能够抵抗多种干扰和攻击,具有良好的稳定性和鲁棒性,并验证了以上分析。

关键词: MPEG 压缩;DCT 变换;直流系数;视频水印

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2004)03-0174-06

随着信息技术和计算机网络的飞速发展,人们不但可以通过互联网和 CD-ROM 方便快捷地获得多媒体信息,还可以得到与原始数据完全相同的复制品,由此引发的盗版问题和版权纷争已成为日益严重的社会问题。因此,数字多媒体产品的水印处理技术已经成为近年来研究的热点领域之一。

虽然数字水印技术近几年得到长足发展,但方向主要集中于静止图像。由于包括时间域掩蔽效应等特性在内的更为精确的人眼视觉模型尚未完全建立,视频水印技术的发展滞后于静止图像水印技术。另一方面,由于针对视频水印的特殊攻击形式的出现,为视频水印提出了一些区别于静止图像水印的独特要求。

笔者分析了 MPEG 视频结构的特点,提出了一种面向 DCT 变换的视频数字水印算法的改进方案以及实现。

1 问题的提出

Arena 等人提出了水印直接嵌入在 MPEG 压缩数据比特流中,从而避免了将水印嵌入在像素域中所必需的将视频码流解码与再编码的繁重的运算。文章提出了水印只嵌入在 MPEG 中的 IVOP 帧的算法,不修改 PVOP 帧和 BVOP 帧,这是基于如下考虑:减小算法复杂度;对帧跳跃与帧删除稳健,因为 IVOP 帧不可以被跳跃或删除。文章还指出,为了更容易地依据 MPEG 语法结构来处理,该算法选择宏块而不是像素作为比特流的操作单位,将水印信息的每一个比特位扩展到一定数量的宏块中。水印嵌入在压缩比特流中,虽其显著优点是没有解码和再编码的过程,不会造成视频质量的下降,但是由于压缩比特率的限制而限制了嵌入水印的数据量的大小。

因此,我们提出了一种基于 MPEG 压缩域的面向 DCT 变换的视频数字水印算法,其方法是首先把图像分成 8×8 的不重叠像素块,再经过分块 DCT 变换,得到由 DCT 系数组成的频率块,然后随机选取一些频率

收稿日期: 2004-02-25

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(M603178)

作者简介: 叶 绿(1962—),女,浙江杭州人,副教授,主要从事多媒体技术、图形图像处理及网络技术的研究。

块,将水印信号嵌入到由密钥控制选择的一些 DCT 系数中。因为本算法是将水印信息嵌入到直流系数中,所以具有较高的鲁棒性。正是由于 DCT 变换是目前多媒体视频压缩几大标准(H. 261, H. 263, MPEG 等)中共同采用的技术基础,基于 DCT 的水印算法在压缩视频中具有显著的优势。这种方案不但无需引入额外的变换以获取视频的频谱分布,而且能有效抵抗其中 DCT 参数重新量化的影响。

2 算法的设计

在视频数字水印设计中应考虑的几个方面是:① 水印容量 嵌入的水印信息必须足以标识多媒体内容的购买者或所有者;② 不可察觉性 嵌入在视频数据中的数字水印应该不可见或不可察觉;③ 鲁棒性 押在不明显降低视频质量的条件下,水印很难除去;④ 盲检测 水印检测时不需要原始视频,因为保存所有的原始视频几乎是不可能的;⑤ 篡改提示 当多媒体内容发生改变时,通过水印提取算法,能够敏感地检测到原始数据是否被篡改。

视频水印的嵌入算法一般可分为三类:

(1) 水印直接嵌入在原始视频流中。此方案的优点是:水印嵌入的方法较多,原则上数字图像水印方案均可应用于此。缺点是:会增加视频码流的数据比特率;经 MPEG 有损压缩后会丢失水印;会降低视频质量;对于已压缩的视频,需先进行解码,然后嵌入水印,再重新编码。

(2) 水印嵌入在编码阶段的离散余弦变换(DCT)的直流系数(DC)中(量化后、预测前)。此方案的优点是:水印仅嵌入在 DCT 系数中,不会增加视频流的数据比特率;易设计出抗多种攻击的水印;可通过自适应机制依据人的视觉特性进行调制,在得到较好的主观视觉质量的同时得到较强的抗攻击能力。缺点是:对于已压缩的视频,有一个部分解码、嵌入、再编码的过程。

(3) 水印直接嵌入在 MPEG 压缩比特流中。优点是:不需完全解码和再编码的过程,对整体视频信号的影响较小。缺点是:视频系统对视频压缩码率的约束将限制水印的嵌入量;水印的嵌入可能造成对视频解码系统中运动补偿环路的不良影响;该类算法设计具有一定的复杂度。

在多媒体压缩视频中,MPEG 视频编解码基于 VOP(Video Object Plane)。从时间上看,分为帧内(IVOP)、前向因果预测 VOP(PVOP)、双向非因果预测 VOP(BVOP)、全景的灵影 VOP(SVOP)。IVOP 只用本身的信息进行编码,PVOP 利用过去的参考 VOP 进行运动补偿的预测编码,BVOP 利用过去和将来的参考 VOP 进行双向运动补偿的预测编码,SVOP 一系列运动图像中的静止背景。因此,IVOP 的图像信息较独立,最适合嵌入水印信息。从空间上看,它由若干个大小为 16×16 的宏块(Macro Block)组成,每个宏块包括大小为 8×8 的 6 个子块。其中 4 个亮度子块 Y,1 个色度子块 U,1 个色度子块 V。

笔者提出的嵌入算法是第二类方案的改进,通过对选定的 DCT 系数进行微小变换,以满足特定的关系,来表示一个比特的信息。为了不受量化过程的影响,本方案将水印嵌入在量化后的 DCT 系数中,从而提高了水印生存的稳定性。在 MPEG 压缩算法中,DCT 系数的量化是关键,它直接影响视频的质量和码流控制算法。为此,MPEG 提供了一个供参考的标准量化表。该表根据人类视觉模型(HVS)建立。考虑到人眼对高频信息损失的敏感度较低频损失小很多,因此通常把水印嵌入到中低频信息中,从而提高了水印信息的鲁棒性。另外,根据人眼对亮度信息的变化比色度信息较敏感这一特性,为最大限度地保持视频质量,本方案将水印嵌入到色度子块的 DCT 系数中。由于 DCT 是目前多媒体视频压缩中被广泛采用的技术基础,因此,基于 DCT 的视频水印方案具有显著的优势。将水印信息嵌入到 IVOP 色度量化的 DCT 直流系数中,不但无需引入额外的变换以获取视频的频谱分布,且水印信息不受 DCT 系数量化带来的影响。

在水印信号提取时,若选取相同的 DCT 系数,并根据系数之间的关系抽取比特信息,因为将水印信息嵌入到视频流中 IVOP 帧的色度 DCT 的直流系数中,则经扩频调制后的水印信息嵌入到视频流 IVOP(Intra Video Object Plane)中色度 DCT 直流系数的最低位,就不需要完全解码,所以大大减少的运算的复杂度,提高了实时性。另外,由于嵌入到色度 DCT 的直流系数中,所以在保证视频效果不失真的前提下,水印具有很强的鲁棒性。下面将根据多媒体压缩视频的特点,进而给出具体的算法及设计过程。

2.1 嵌入算法

将水印信息经 m 序列(最长线性反馈移存器序列, $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)$, 其中 $m_i \in \{0, 1\}$) 调制后加入到 IVOP 的色度子块 DCT 的直流系数中。DCT 的直流系数中, 这样的水印信息在不影响视频效果的情况下, 一般是难以去除的, 所以, 鲁棒性是足够强的^[6]。关键问题是色度 DCT 的直流系统是一个对视觉系统很敏感的参数, 本方案在色度 DCT 的直流系数上加水印相当于对其加入微量干扰, 必须使这种干扰低于一定的门限值, 使人眼的视觉系统对视频中色度的微小变化感觉不到。经过试验将水印嵌入到 IVOP 的色度 DCT 的直流系数的最低位能满足要求。所以将根据直流系数的大小自适应地加上不同的强度水印, 以提高数字水印检测率并且提高了视频的效果^[7]。

本算法将视频码流部分解码后, 再将水印信息经 m 序列调制后嵌入到视频 IVOP 帧的色度 DCT 的直流系数中。此方案由于是部分解码, 因此, 减小了完全解码和再重编码的运算的复杂度, 并且提高了水印嵌入的速度。

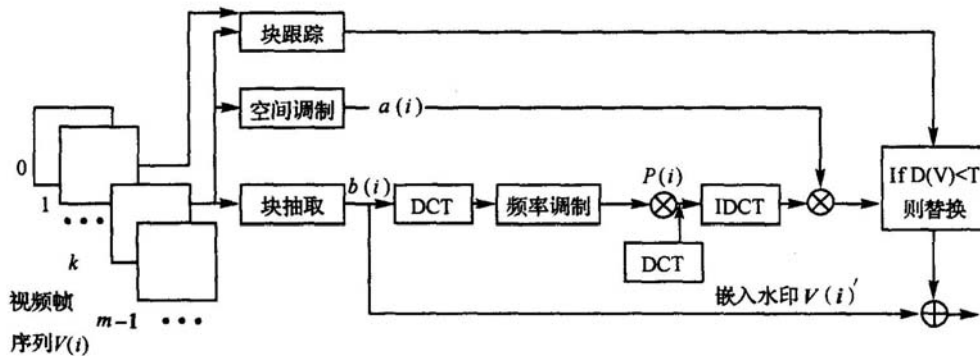


图 1 在 DCT 嵌入水印的过程图中

每一水印信息会通过 m 序列的调制嵌入到相应的 IVOP 色度对应的 DCT 直流系数(量化后、预测前)的最低位, 这样水印信息在不影响视频效果的情况下一般难以去除。同时, 嵌入在直流系数的最低位, 带来的误差非常小。

先将每一水印信息位通过一个伪随机序列的调制来嵌入到大量的视频 IVOP 上色度 DCT 的直流系数 DC 中。具体见下面的公式:

$$V(i)' = V(i) + a(i) \times b(i) \times p(i) \quad \text{其中 } i = 0, \dots, m-1$$

这里的 $V(i)'$ 是已经嵌入水印的 IVOP 帧上色度 DCT 的直流系数 DC 值; $b(i)$ 来表示第 i 个水印比特位, 当第 i 个水印比特位分别为 0 或 1 时, $b(i)$ 的取值分别为 1 或 -1; $a(i)$ 是为了考虑掩蔽效果而用来调整水印强度所使用的系数; $P(i)$ 是伪噪声扩展序列, 为 0、1 的 m 序列, 但这里当序列值为 0 时, $P(i)$ 为 -1, 若序列值为 1, 则 P_i 为 1。

2.2 水印提取算法

本方案不需要从原视频码流来提取水印信息。通过对已加入水印的视频码流进行部分解码, 针对于 IVOP 帧上相应的色度 DCT 的直流系数 DC 进行如下相关运算:

$$F(k) = \sum_{i=k+Cr}^{(k+1)Cr-1} \overline{V(i)'} P(i) = b(k) \sum_{i=k+Cr}^{(k+1)Cr-1} a(i) + \sum_{i=k+Cr}^{(k+1)Cr-1} V(i)' P(i) = Cr \times \overline{a(k)} + b(i)$$

这里“ $\overline{}$ ”是已经嵌入水印的视频码流数据(有可能受到有意或无意的破坏); $V(i)' = \overline{V(i)'} - a(i) \times b(i) \times p(i)$ 被看成水印中所引入的噪声。通过相关值 $F(k)$ 的结果来得到所嵌入的水印的比特位, 误码率依赖于扩展系数 Cr , 和 $\overline{a(k)}$ 。 m 序列的特点是有良好的自相关性, 当它与其他序列相乘时, 其值非常小, 而且随着 Cr 越大, 其值越小并趋于 0。所以上式中 $F(k)$ 的正负主要决定于 $\overline{a(k)}$, 也就决定于 $b(k)$, 所以, 检测到的水印比特位与原先嵌入的水印信息比特位是相同的。具体关系如下: 若 $F(k)$ 为正号, 即 $b(k) = 1$, 则水印比特位为 1; 若 $F(k)$ 为负号, 即 $b(k) = -1$, 则水印比特位为 0; $C(r)$ 是每个水印位所扩展到直流系数 DC 的个数。

3 具体实现方案

3.1 视频水印嵌入实现

首先对多媒体压缩视频流进行部分解码并得到 IVOP 帧上的色度 DCT 的直流系数,为了保证视频的视觉效果,每隔 10 个色度 DCT 的直流系数加入一次水印,来修改 DC 的值 dct_diff ,见如下代码:

$dct_diff += Intension * watermarkbit * m[m_index]$;这里的 $watermarkbit$ 是依据水印对应比特位而得到的,水印比特位若为 0,则 $watermarkbit = -1$; 水印比特位若为 1,则 $watermarkbit = 1$; $m[m_index]$ 是长度为 127 的 m 序列,是由函数 $Generate_m_sequence()$ 得到的,每个 m 序列完成对水印的 1 个比特位进行调制;

具体代码如下:

```
#define M_LEN 127
#define M_SERIES 7
static void Generate_m_sequence()
{int i;
  for(i=0;i<M_SERIES;i++)
    m[i]=1;
  for(i=M_SERIES;i<M_LEN;i++)
    {m[i]=m[i-5]+m[i-7];
     m[i]=m[i]%2;}
  for(i=M_SERIES;i<M_LEN;i++)
    m[i]=(m[i])? 1:-1;}
```

$Intension$ 是嵌入水印的强度,这里我们根据直流系数 DC 的绝对值大小来选择不同的强度,这样既可以有效地保证视频效果,又可以提高水印检测率; $Intension$ 的值是根据视频效果和检测成功率之间的权衡来更改的。代码如下:

```
if(abs(dct-diff)<2)           else if(abs(dct-diff)<20)
    Intension=2;                Intension=5;
else if(abs(dct-diff)<10)      else
    Intension=4;                Intension=8;
```

完成上述操作后,将修改后的 DC 值写入视频码流中,另外,完成一个水印信息嵌入后,将从下一个 IVOP 帧重复嵌入该水印信息。

3.2 视频水印提取实现

首先对 IVOP 帧上的色度 DCT 的直流系数 DC 进行计数,因为每隔 10 个色度 DCT 的直流系数 DC 加入一次水印,所以,提取时也每隔 10 个直流系数 DC 来进行提取,得到 m 序列与色度 DCT 的直流系数的乘积的累加和 dct_diff_sum ; $dct_diff_sum += dct_diff * m[m_index]$; 如果一个长度为 127 的 m 序列已经完成,即 $m_index == M_LEN$ 时来判断 dct_diff_sum 是否大于 0,若大于 0 则该信息位为 1,否则该水印信息位为 0。

```
char tmpchar = 0;
if (m_index == M_LEN)
{ tmpchar <<= 1;
  if(dct_diff_sum > 0)
    tmpchar |= 1;
  else
```

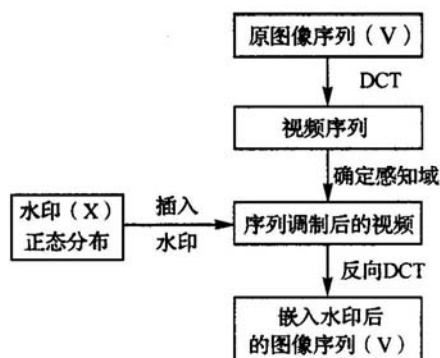


图2 水印嵌入主要步骤

```

    tmpchar|=0;
    dct_diff_sum=0;
    m_index=0;
    BitCount++;}

```

当 tmpchar 已经存满 8 位后,即已经提取到一个水印字符,则将 tmpchar 存入缓存 OutStr 中;当缓存 OutStr 中字符数与水印信息的长度相同时,证明缓存 OutStr 中的信息应为提取到的水印信息,我们将它与正确的水印信息 MarkStr 进行同或运算,然后求得相关值 cor,最终得到提取正确的水印比特位比例 fcor,这里有如下三种情况:

(1) 如果 fcor 为 1.0,证明提取到水印信息是完全正确的,输出结果为“正确地检测到数字水印为:*****”;

(2) 如果 $fcor > 0.75$,证明提取到水印信息是大部分正确的,证明所提取到的信息一定含有水印,输出结果“有水印存在”;

(3) 如果不是前两种情况,那么很难确定是否含有水印信息,输出结果“无水印存在”。

```
if(BitCount==8)
```

```

    { OutStr[i]=tmpchar;
      i++;
      if(i==mark-len)
      { for(j=0;j<i;j++)
        { tmp=~(OutStr[j]MaskStr[j]);
          for(k=0;k<8;k++)
          { cor+=(tmp&MaskChar)?1:0;
            MaskChar>>=1;
            MaskChar=1<<7;
            fcor=(float)cor/(i*8);

```

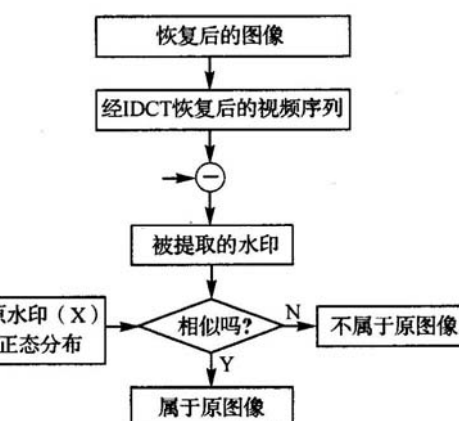


图 3 水印提取主要步骤

```

    if(fcor==1.0)
    printf("正确地检测到数字水印
    为:%s/n",Outstr)
    else
    if(fcor>0.75)
    printf("有水印存在");
    else
    printf("无水印存在");
    exit(0);
    tmpchar=0;
    BitCount=0;}

```

4 实验结果分析

试验结果表明, m 序列的长度越长,检测效果越好,但能够嵌入的水印信息量也相应地减少,根据检测理论的相关性分析,有水印的符号相关值有明显的峰值现象。因此,可确定检测门限值的方法如下:

(1) 随机生成 1 000 个数字随机数种子(不包含用于水印嵌入的随机数种子);

(2) 分别用这 1 000 个随机数种子生成伪随机序列,并分别计算这 1 000 个随机数的相关值;

(3) 取 1 000 个相关值中的最大值作为检测门限值,为准确起见,也可对其进行适当的放大,以降低系统虚检率。所谓虚检(False Positive)率,就是将没有水印信号的运动信号误认为含有水印的运动信号的概率,这样会提高漏检(False Negative)率,即未能从含有水印的运动信号中水印信号的概率,检测结果如图 4(b)、(c)所示。

在本方案中,水印提取时无需原始视频,若水印信息未受到攻击,可提取到原始视频的完全水印;若水印信息受到攻击,如 SNR 攻击,运动信号传输过程中的容易受到 Gauss 白噪声的攻击,以信号平均功率为基准计算信噪比,图 4(d)给出了加 5 dB 噪声攻击测试后的信号。根据扩频解调性质,本方案可以最大限度地恢复出原始水印信息。由于 DCT 是目前多媒体视频压缩几大标准(H. 261、H. 263、MPEG 等)共同采用的技术基础。因此,基于 DCT 的水印方案在视频压缩中具有非常重要的研究意义和应用前景。

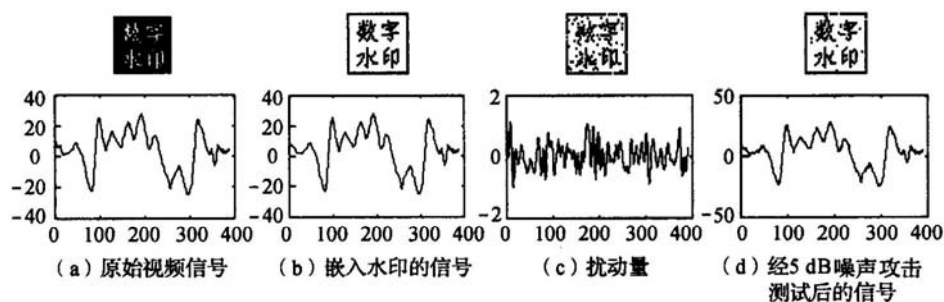


图4 数字水印检测结果

参考文献:

- [1] Tae-Yun Chung, Kang-Seo Park, Young-Nam Oh, *et al.* Digital watermarking for copyright protection of MPEG2 compressed video[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 1998, 44(3): 895-901.
- [2] Arena S, Caramma M, Lancini R, *et al.* Digital watermarking applied to MPEG-2 coded video sequences exploiting space and frequency masking[R]. Vancouver: Image Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on, 2000, 438-441.
- [3] 黄继武, SHI Yun Q, 程为东. DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 57-60.
- [4] Su K, Kundur D, Hatzinakos, D. A content-dependent spatially localized video watermark for resistance to collusion and interpolation attacks[R]. Vancouver: Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on, 2001, 818-821.
- [5] 易开祥, 石教英, 孙 鑫. 数字水印技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(2): 111-117.
- [6] Frank Hartung, Bernd Girod. Watermarking of uncompressed and compressed video[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 283-301.
- [7] 尹康康, 石教英, 潘志庚. 一种鲁棒性好的图像水印算法[J]. 软件学报, 2001, 12(5): 668-676.
- [8] Tao B, Dickinson B. Adaptive Watermarking in DCT Domain[R]. Acoustics; Proc of IEEE International Conf, 1997.

Research of a video digital watermarking algorithm based on MPEG domain

YE Lu

(Dept. of Computer and Electronics Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: According to the principle of MPEG video compression, this paper brings forward a video digital watermarking algorithm based on MPEG domain oriented to DCT transformation, and goes into particulars the process of the design and realization of the algorithm which embeds the watermarking information modulated by m sequence into the direct current coefficient of the DCT transformation of frame's chroma. Experiment verifies that this algorithm, depending on the foundation of not reducing the quality of video, can resist multiple disturbance and attack, and have good stability and robust.

Key words: MPEG compression; DCT transformation; direct current coefficients; video watermarking