

基于 H. 264/ AVC 的视频信息隐藏算法

胡 洋,张春田,苏育挺
(天津大学电子信息工程学院,天津 300072)

摘 要: 在 H. 264/ AVC 的帧内预测环节,调制 H. 264/ AVC 编码中 I 帧 4×4 亮度块的帧内预测模式实现信息隐藏. 这种调制基于该模式与待隐藏比特之间的映射规则进行. 宿主 4×4 块的具体位置由各块自身特点结合密钥所指定的嵌入位置模板确定. 信息的提取过程不需要原始视频内容,也不需完全解码,而只要对码流中的帧内预测模式进行解码即可.

关键词: 信息隐藏; H. 264/ AVC; 帧内预测模式; 映射; 位置模板

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 04-0690-05

Information Hiding for H. 264/ AVC

HU Yang, ZHANG Chun-tian, SU Yu-ting

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: During the intra prediction step of H. 264/ AVC video compression standard, information hiding is implemented by modifying the intra prediction modes of qualified intra 4×4 luma blocks. The modulation is based on the mapping rules between these modes and the hidden bits. The specific positions of the host 4×4 blocks are determined by the features of every block and a position template indicated by the key. The detection of hidden information needs no original media, and merely requires decoding the intra prediction modes from bit stream rather than decoding the whole video.

Key words: information hiding; H. 264/ AVC; intra prediction modes; mapping; position template

1 引言

近年来,非法使用数字化多媒体的情况日益严重,信息安全问题变得非常突出^[1]. 自 20 世纪末,信息隐藏技术迅速发展起来,它有助于解决和防止数字化信息被篡改、仿造、盗版和攻击. 而信息隐藏在其他方面的应用也在快速发展,比如携带字幕信息、视频索引以及在通信系统中作为一个传递特定信息的附加信道. 目前,在多媒体信息隐藏技术的研究和应用中,以数字视频为宿主媒体的情况非常广泛,而数字视频的存在形式又离不开压缩^[2].

H. 264/ AVC 是最新的视频压缩编码标准,采用的也是一种 DPCM 加变换编码的混和编码技术. 在此基础上,还采用了帧内预测、多参考帧和可变尺寸帧间预测、整数变换、自适应熵编码等新技术,具有更高的编码效率和网络友好性. 这些优异的性能将使其在数字电视广播、视频实时通信、网络视频流媒体传递以及多媒体短信等领域发挥重要作用. 因此迫切需要针对 H. 264/ AVC 的信息隐藏方法,但该标准采用的复杂编码方法和高压

缩效率使其对编码中的微小变化非常敏感,这使得对其隐藏信息具有很大困难和挑战. 现有的针对 H. 264/ AVC 的信息嵌入方法主要包括:基于量化后的整数变换系数实现信息嵌入^[3~5],和利用运动向量进行信息嵌入^[6].

本文提出的算法利用 H. 264/ AVC 特有的编码技术——帧内预测,来实现具有较高嵌入率的信息隐藏. 在嵌入域上有别于传统的用于视频媒体的信息隐藏方法. 在每个满足嵌入条件的帧内 4×4 亮度块中嵌入 1 比特信息,信息嵌入的实现主要基于预先建立的映射规则,在各种具体情况下,各帧内 4×4 亮度块的预测模式映射于某二值待嵌入比特(0 或 1),通过调制该预测模式使之恰好映射为待嵌入的比特来实现信息隐藏,具体算法将在文中第四部分介绍.

2 H. 264/ AVC 帧内预测

帧内预测是 H. 264/ AVC 特有的一项编码技术,利用该技术可以降低视频帧的空间冗余,进而获得更高的压缩效率. 在帧内预测中,一个当前块/宏块的像素值通过邻近的已编码并重建的块/宏块的边界像素值进行

预测,再对预测块与当前块相减得到的残差块进行整数变换、量化、熵编码。对于 4×4 的帧内预测亮度块(I4 块),有 9 种帧内预测模式(I4 模式); 16×16 的帧内预测亮度块,有 4 种帧内预测模式。这里主要介绍 I4 块的帧内预测,更详细的关于 H.264/AVC 的介绍请见参考文献[7]和[8]。

2.1 4×4 亮度块的帧内预测模式选择

对于当前 I4 块 X,如图 1 所示,预测像素 $a-p$ 为当前亮度块各像素的预测值,参考像素 A-M 为其相邻的已编码并重建块的边界像素值。9 种帧内预测模式中的每一种对应着一个预测方向,如图 2 所示,其中的数字为各预测模式的标号,在对预测模式进行比较、计算、选取等操作时使用。在每种预测模式下,通过对参考像素值 A-M 进行相应的加权平均,获得当前块的预测像素值 $a-p$ 。例如,模式 2 为直流(DC)预测,各个预测像素值按照 $(A+B+C+D+I+J+K+L)/8$ 得到。其他预测模式下的预测方法与此相似,只是权值有所不同。

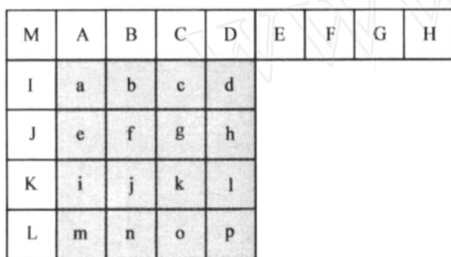


图 1 当前 4×4 帧内预测块的预测像素及其参考像素

为了从 9 种 I4 模式中有效的选择最优模式, H.264/AVC 编码器采用了基于 Lagrangian 优化算法的率失真优化模型实现预测模式的选择。当前 I4 块的最优编码模式应当使编码后的 Lagrangian 代价函数 $J(S, I)$ 达到最小, $J(S, I)$ 的定义如下:

$$J(S, I) = D(S, I) + \lambda R(S, I) \quad (1)$$

其中, λ 是 Lagrangian 参数, $D(S, I)$ 与 $R(S, I)$ 分别表示输出比特流的失真度和码率, 比特流由采用编码模式 I 对样本 S 进行编码输出^[9]。这样选出的最优编码模式, 由 O_X 表示, 其做为当前块所采用的编码模式, 由 M_X 表示, 即 $M_X = O_X$ 。

2.2 4×4 亮度块帧内预测模式的信号化

H.264/AVC 除了具有丰富的帧内编码模式, 还充分利用空间相邻块之间的相关性来编码这些模式, 获

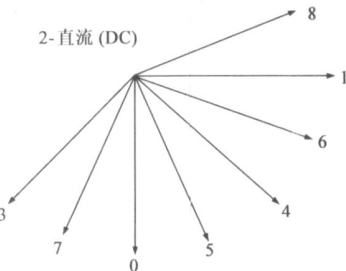


图 2 各种帧内 4×4 预测模式的标号及其对应的预测方向

得更高的压缩效率。首先, 编码器利用当前块的上邻块 B_A 的预测模式 M_A 以及左邻块 B_B 的预测模式 M_B , 按下式计算得到当前块的最可能预测模式, 由 P_X 表示:

$$P_X = \min\{M_A, M_B\} \quad (2)$$

之后, 编码器分配给 I4 块一个标志 F_X 。如果 $O_X = P_X$, 则 $F_X = 1$; 否则 $F_X = 0$, 此时, 编码器分配给 I4 块另一个参数 R_X 来指示预测模式, 如式(3):

$$R_X = \begin{cases} O_X, & O_X < P_X \\ O_X - 1, & O_X > P_X \end{cases} \quad (3)$$

R_X 仅用 8 个值(0~7)就可以指示 9 种 I4 模式。

3 符号说明

为使表达清晰、简练, 文中用到的一些符号及缩写, 现介绍如下:

- I4 块: 帧内预测 4×4 亮度块;
- I4 模式: I4 块的预测模式, 共 9 种;
- X: 当前 I4 块;
- P_X : 当前块 X 的最可能预测模式;
- M_X : 当前块 X 实际采用的预测模式;
- F_X, R_X : 对 M_X 编码时的指示标志及指示参数;
- w: 待嵌入比特;
- w: 提取出的隐藏比特;
- O_X : 当前块 X 的最优 I4 模式;
- O_X^* : 当前块 X 的次优 I4 模式;
- O_X : 与 w 相对应的最优 I4 模式;
- HB: 信息隐藏时的宿主块;
- CB: 信息隐藏时的候选块。

4 提出的信息隐藏算法

本文提出的信息隐藏算法利用 I4 模式和二值待嵌入信息之间的映射关系, 将信息嵌入到 I 帧 4×4 亮度块的帧内预测模式中。在介绍具体嵌入和提取方法之前, 先对嵌入条件和映射规则进行说明。

4.1 嵌入条件

在本文中, 宿主块(HB)指携带隐藏信息的 I4 块, 它必须满足以下两个嵌入条件。

嵌入条件一: 该 I4 块是候选块(CB), 也就是具备 $F_X = 0$ 的 I4 块。因为在 I 帧中, 各个块的标志 F_X 的分布与图像的特征具有一定相关性。例如, 在图像的细节或纹理区域, F_X 大部分为 0; 而在较平滑的图像区域, F_X 大多为 1。为了保持 F_X 的这种分布特征以加强信息隐藏的隐蔽性, 嵌入过程将保持 F_X 不变。这样, 当 $F_X = 1$ 时, 除了 P_X 之外将没有可以采用的 I4 模式, 所以不能进行模式调制, 这样的块不隐藏信息; 而当 $F_X = 0$ 时, 除 P_X 之外的 8 种 I4 模式都可以作为 M_X 的备选模式,

所以这样的块可以通过调制 I4 模式隐藏信息,称为候选块,用 CB 表示. 该条件的运用还保证了在图像相对平滑区域少嵌或不嵌隐藏信息,使得算法具有更高的透明性.

嵌入条件二:该 I4 块位于嵌入位置模版中的嵌入点处. 本算法中,嵌入位置模版由密钥决定,每个密钥唯一的指定一个模版用于信息隐藏中确定嵌入点位置. 模版的大小、最大嵌入密度和嵌入点排列方式可以根据具体情况和需要来规定,这里我们以宏块尺寸的模版为例进行说明. 一个宏块大小的嵌入位置模版对应着 16 个 I4 块,如图 3 所示,每个小方格代表与其位置对应的 I4 块,阴影表示可嵌入点,而空白表示不可嵌入点. 图中仅列出了最大嵌入密度为 1/8、1/4、1/2 和 3/4 时的几种典型模版. 因为模版中规定的嵌入点需要同时满足“嵌入条件一”才能进行信息嵌入,在真正的信息隐藏过程中,位置模板中的一些可嵌入点并不满足“嵌入条件一”,所以模板中的嵌入密度仅是理论上可能达到的最大值,实际的嵌入密度要小于这个最大嵌入密度. 在具体应用中,通过改变模板尺寸、最大嵌入密度以及嵌入点排列规则可以获得非常丰富的模板

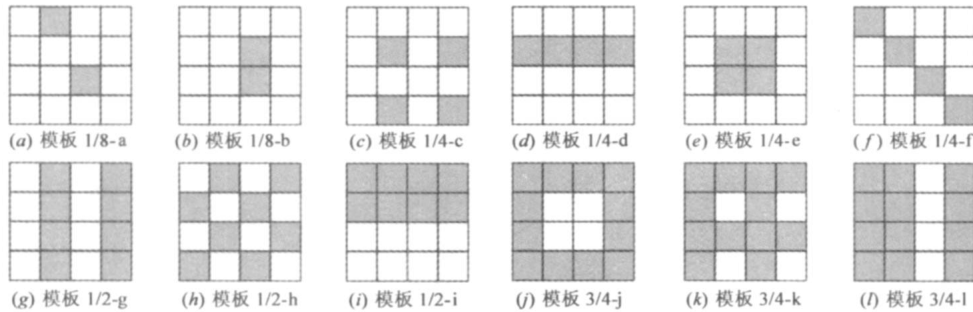


图 3 典型嵌入位置模板

表 1 最优和次优预测模式对联合概率表

	次优模式 0	次优模式 1	次优模式 2	次优模式 3	次优模式 4	次优模式 5	次优模式 6	次优模式 7	次优模式 8
最优模式 0	0	0.0432	0.0418	0.0218	0.0083	0.0238	0.0051	0.0290	0.0193
最优模式 1	0.0262	0	0.0428	0.0078	0.0089	0.0049	0.0301	0.0089	0.0903
最优模式 2	0.0326	0.0153	0	0.0085	0.0116	0.0096	0.0100	0.0103	0.0431
最优模式 3	0.0062	0.0038	0.0072	0	0.0023	0.0021	0.0025	0.0202	0.0084
最优模式 4	0.0052	0.0049	0.0088	0.0039	0	0.0221	0.0244	0.0034	0.0085
最优模式 5	0.0185	0.0044	0.0109	0.0036	0.0210	0	0.0030	0.0044	0.0048
最优模式 6	0.0035	0.0153	0.0092	0.0030	0.0242	0.0037	0	0.0013	0.0111
最优模式 7	0.0158	0.0033	0.0081	0.0185	0.0020	0.0055	0.0025	0	0.0075
最优模式 8	0.0065	0.0378	0.0244	0.0113	0.0057	0.0024	0.0117	0.0082	0

利用表 1 中的信息,可以由下式得到每种 P_X 情况下的最佳分组方式:

$$K_p = \min_k \left\{ \sum_{i,j=1}^4 P(m_{pki}, m_{pkj}) + \sum_{i,j=1}^4 P(n_{pki}, n_{pkj}) \right\}$$

$$k = 1, 2, \dots, 35; p = 0, 1, \dots, 8 \quad (4)$$

其中, K_p 表示 $P_X = p$ 时的最佳分组方式; m_{pki} 表示 $P_X = p$ 时,第 k 种分组方式中 M 组的第 i 个预测模式; n_{pki} 表

示 $P_X = p$ 时,第 k 种分组方式中 N 组的第 i 个预测模式; $P(x, y)$ 表示 O_X 和 O_X^* 分别为 x 和 y 的概率.

4.2 映射规则

在每一种 P_X 情况下,有除该 P_X 之外的 8 种备选预测模式,将它们平均分成两组 M 和 N,分别映射为待嵌入比特 0 和 1,如图 4 所示. 为了使 I4 模式的调制对编码视频造成的影响尽可能小,调制前后的预测模式所产生的预测效果应该尽量相似. 因此在必须改变预测模式的情况下,我们希望这种改变是将采用的预测模式从最优模式 O_X 变为次优模式 O_X^* ,也就是具有第二小的 Lagrangian 代价函数的预测模式. 所以,在进行备选模式分组的时候, O_X 和 O_X^* 要尽量处于不同的组中.

将 8 种备选模式二等分一共有 35 种分组方式,从上面的分析可见,最佳分组方式应该满足: O_X 和 O_X^* 最大可能的分在不同组中,即 O_X 和 O_X^* 分在同一组中的概率最小. 表 1 给出了所有可能的 (O_X, O_X^*) 对的联合概率,该数据从 10 个测试序列的十万多个 I4 块的最优和次优预测模式样本中统计获得.

示 $P_X = p$ 时,第 k 种分组方式中 N 组的第 i 个预测模式; $P(x, y)$ 表示 O_X 和 O_X^* 分别为 x 和 y 的概率.

计算得到的备选预测模式最佳分组方式在表 2 中列出. 如图 2 所示,相邻的预测方向具有相似的预测效果,当某个预测模式为 O_X 时,相应的 O_X^* 很可能是预测方向与 O_X 相邻的预测模式,所以应尽量使相邻预测方向对应的模式位于不同组中,表 2 中的分组结果与以上

分析基本一致.

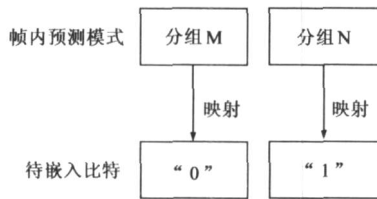


图 4 帧内预测模式与待嵌入比特之间的映射

表 2 备选预测模式的最优分组

最可能预测模式 P_X	备选模式分组 M (映射到 0)	备选模式分组 N (映射到 1)
模式 0	1, 2, 3, 4	5, 6, 7, 8
模式 1	0, 3, 4, 8	2, 5, 6, 7
模式 2	0, 3, 4, 8	1, 5, 6, 7
模式 3	0, 5, 6, 8	1, 2, 4, 7
模式 4	0, 3, 6, 8	1, 2, 5, 7
模式 5	0, 3, 6, 8	1, 2, 4, 7
模式 6	0, 3, 4, 8	1, 2, 5, 7
模式 7	0, 5, 6, 8	1, 2, 3, 4
模式 8	0, 1, 3, 4	2, 5, 6, 7

4.3 嵌入过程

基于上述嵌入条件和映射规则,信息隐藏过程可通过如下步骤实现:

根据密钥确定嵌入位置模版.

计算当前块 X 的 P_X 和 O_X .

判断当前块是否满足“嵌入条件一”.如果满足,即 $P_X = O_X$,则继续进行下一步;否则,该块不隐藏信息 ($M_X = O_X = P_X$).

判断当前块是否满足“嵌入条件二”.如果满足,即该块位于嵌入位置模版的嵌入点处,则继续进行下一步;否则,该块不隐藏信息 ($M_X = O_X = P_X$).

准备待嵌入比特 w .

嵌入 w .如果 O_X 恰好映射为 w ,则不需要改变当前块的预测模式即可实现嵌入 ($M_X = O_X = P_X$);否则,在映射到 w 的备选预测模式分组中找出最优的预测模式 O_X ,将 M_X 变为 O_X ($M_X = O_X = P_X$).

嵌入结束.

可见,信息隐藏过程仅在原始编码的基础上进行一些比较和赋值操作,没有增加大量的运算,具有复杂度低和速度快的特点.

4.4 提取过程

本算法中,对于隐藏信息的提取操作简单、快速,仅解码码流中的帧内预测模式信息即可实现信息提取,而不必完整的视频解码,也不必提供原始媒体信息.具体过程如下:

根据密钥确定嵌入位置模版.

解码当前块的帧内预测模式信息,获得 F_X 和 R_X (如果 R_X 存在).

计算当前块的 P_X 和 M_X .

判断当前块是否满足“嵌入条件一”.如果满足,即 $F_X = 0$,则继续下一步;否则,不从该块提取信息.

判断当前块是否满足“嵌入条件二”.如果满足,即该块位于嵌入位置模版的嵌入点处,则继续下一步;否则,不从该块提取信息.

提取 1 比特隐藏信息.根据当前块的 P_X ,在相应的映射表中查找预测模式 M_X 对应的嵌入比特 w ,该 w 即为提取的 1 比特隐藏信息.

4.5 安全性

本算法的设计中,对安全性的考虑主要在如下几方面:

考虑到保持码流中 F_X 标志的分布及统计规律,信息隐藏不引起这些规律的变化,从而提高算法对分析码流检测隐藏信息的抵抗能力.

由于密钥与嵌入位置模板一一对应,而 4.1 节介绍了本算法具有丰富的模板资源,保证了较大的密钥空间,从而获得算法的高安全性.

信息嵌入到视频编码的帧内预测模式中,这是 H.264/AVC 编解码中的重要信息,传输中具有很高的可靠性,保证这部分信息得以完整传输并正确解码,使隐藏信息能够正确提取.

5 实验结果

本算法已在 H.264/AVC 的参考软件 JM11.0^[10] 上进行了仿真.实验中对 4 个 199 帧 QCIF 格式的测试序列 (Grandma, Silent, Bridge Close, News) 进行了 12 种典型模版 (图 3) 下的信息隐藏及提取.参考软件的编码设置为:RDO, CABAC, QP = 28, 30 帧/每秒;GOP 采用“IBPBPBPBP”的结构.

实验主要从信息隐藏量、编码视频的主客观质量以及编码比特率三个方面对算法进行评估.实验数据在表 3 中给出,其中“HBQ”表示信息隐藏的比特数量,“PSNRI”表示信息隐藏后亮度分量的峰值信噪比变化,“BRI”表示信息隐藏后的编码比特率对于未隐藏时的编码比特率的相对增量.

从实验结果可以看出,信息隐藏率随着嵌入位置模版中嵌入点密度的增加而增大,相应的码流比特率也随之略有增加,而编码视频的客观质量并未受到明显的影响.这主要是因为,帧内预测本身并不直接造成编码视频的失真,实际上,对于预测模式的调制仅产生不同的预测值,进而产生不同的预测残差.从整个视频编码过程来看,预测残差仍要经过整数变换、量化、熵编码等处理,最终的 H.264/AVC 视频质量是由这些编

表 3 对 4 个测试序列的实验结果

模版	序列 Grandma			序列 Silent			序列 Bridge Close			序列 News		
	HBQ(bits)	PSNRI(dB)	BRI(%)	HBQ(bits)	PSNRI(dB)	BRI(%)	HBQ(bits)	PSNRI(dB)	BRI(%)	HBQ(bits)	PSNRI(dB)	BRI(%)
1/8 - a	1780	0	0.18	2354	- 0.03	0.52	1713	+ 0.01	0.45	1294	0	0.23
1/8 - b	1889	+ 0.01	0.56	2432	+ 0.01	0.76	1888	0	0.39	1269	+ 0.03	0.50
1/4 - c	3580	0	0.92	4379	+ 0.01	1.27	3432	0	0.82	2492	+ 0.01	0.46
1/4 - d	3513	0	1.05	4496	+ 0.01	1.21	3469	0	0.84	2394	0	0.68
1/4 - e	3649	- 0.01	1.12	4700	- 0.01	1.23	3802	- 0.01	0.95	2593	0	0.79
1/4 - f	3555	- 0.02	1.05	4406	+ 0.02	1.32	3257	+ 0.01	0.66	2504	+ 0.01	0.61
1/2 - g	7123	- 0.02	1.63	8674	0	2.08	6756	- 0.01	1.58	4968	+ 0.02	1.63
1/2 - h	6716	- 0.06	1.65	9034	0	2.26	6415	- 0.01	1.62	4869	+ 0.02	1.51
1/2 - i	6772	- 0.05	2.01	8868	+ 0.01	2.25	6264	- 0.04	1.32	4718	+ 0.02	1.46
3/4 - j	9779	- 0.05	2.65	13232	+ 0.01	3.57	9138	- 0.01	2.50	7303	- 0.01	2.05
3/4 - k	9758	- 0.08	2.62	13206	+ 0.01	3.44	9088	- 0.02	2.14	7444	+ 0.03	2.42
3/4 - l	9715	- 0.04	2.71	12913	- 0.01	3.18	9245	- 0.03	2.14	7544	+ 0.02	2.43

码环节共同作用决定的. 因此, 使用本算法进行信息隐藏不会造成必然的视频质量下降.

图 5 为测试序列 News 在 H. 264/ AVC 编码之后的第 90 帧, 即第 9 个 I 帧图像, 其中图 5(a) 是没有隐藏信息的结果, 图 5(b) 是使用嵌入位置模版 3/4 - j 时的信息隐藏结果, 二者没有明显差别. 可见, 信息隐藏并未造成主观视频质量下降.



(a) 未隐藏信息 (b) 按照模板 3/4-j 隐藏信息

图 5 测试序列 News 的 H.264/AVC 编码视频第 9 个 I 帧

6 结束语

本文提出了一种有效的针对 H. 264/ AVC 的视频信息隐藏算法, 该算法利用 H. 264/ AVC 特有的帧内预测模式进行信息隐藏. 由密钥决定嵌入位置模版, 在其控制下, 确定进行信息隐藏的 4×4 帧内亮度块, 并基于 I4 模式和二值嵌入比特间的映射规则实现信息隐藏. 嵌入和提取的过程简单、快速, 并且具有很好的透明性、隐蔽性和安全性. 在获得较高的嵌入率的同时, 码流的比特率仅有少量增加, 而对视频的主客观质量没有造成必然影响.

参考文献:

- [1] COX I J, MILLER M L, BLOOM J A. Digital Watermarking [M]. Elsevier Science, USA, 2002.
- [2] 张春田, 苏育挺, 张静. 数字图像压缩编码 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

- [3] NOORKAMI M, MERSEREAU R M. Compressed domain video watermarking for H. 264 [A]. Proceedings of ICIP [C]. Genova, Italy, 2005. 890 - 893.
- [4] GOLIKERI A, NASIOPOULOS P, WANG Z J. An improved scalar quantization-based digital video watermarking scheme for H. 264/ AVC [A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Island of Kos, Greece, 2006.
- [5] SAKAZAWA Y, TAKISHIMA Y, NAKAJIMA Y. H. 264 native video watermarking method [A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Island of Kos, Greece, 2006.
- [6] Hua Cao, Jingli Zhou, Shengsheng Yu, et al. Implement of semi-fragile blind watermark algorithm for H. 264 low bit-rates video stream [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34 (1): 40 - 44. (in Chinese)
- [7] ITU-T Recommendation H. 264, Advanced video coding for generic audiovisual services [S]. Mar. 2005.
- [8] T WIEGAND, G J SULLIVAN, G BJONTEGAARD, et al. Overview of the H. 264/ AVC video coding standard [J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology, 2003, 13 (7): 560 - 576.
- [9] 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, 2006.
- [10] H. 264/ AVC Joint Model 11.0 (JM-11.0) [CP]. <http://bs.hhi.de/~suehring/tml/download>.

作者简介:



胡 洋 女, 1981 年 5 月出生于辽宁鞍山, 分别于 2005 和 2007 年获得天津大学学士、硕士学位, 现为美国伦斯勒理工学院博士研究生. 主要研究方向为视频编解码、信息隐藏及数字水印. E-mail: huyang_zzzz@hotmail.com