



# H.264 的变换编码和量化过程分析

·新技术·

干宗良, 李晓蕾

(南京邮电学院 信息工程系, 江苏 南京 210003)

【摘要】对 H.264 协议的变换编码和量化进行了理论分析,给出了具体实现过程,论证了这种变换和量化方式的特点、有效性及应用前景。

【关键词】H.264 标准; 离散余弦变换; 整数变换; 哈达码变换; 量化

【Abstract】The transform coding and quantization of H.264 protocol is analyzed theoretically, the concrete process of realization is given, and the features, effectiveness and future applications of this transform and quantization are described.

【Key words】H.264; discrete cosine transform(DCT); integer transform; discrete Hadamard transform(DHT); quantization

## 1 引言

ISO/IEC MPEG 和 ITU-T VCEG 的联合视频专家组(Joint Video Team, JVT)在 2003 年 3 月完成了一个新的视频压缩标准 H.264, 它也是 MPEG-4 的第 10 部分(Advance Video Coding)。H.264 采用了一系列新的压缩方法, 获得了更好的压缩效果。标准中的 DC 变换和量化与先前的标准有比较大的区别。本文首先回顾了先前标准的变换过程, 然后重点地介绍了 H.264 的变换和量化过程, 最后论证了其变换量化的有效性。

## 2 传统的 8×8 点的 DCT 变换

先前的标准, 如 MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.261, H.263 都是采取 8×8 的离散余弦变换(DCT)作为基本变换

$$F(u, v) = 1/4 \alpha(u) \alpha(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cdot \cos[\pi(2x+1)u/16] \cos[\pi(2y+1)v/16] \quad (1)$$

$$f(x, y) = 1/4 \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 \alpha(u) \alpha(v) F(u, v) \cdot \cos[\pi(2x+1)u/16] \cos[\pi(2y+1)v/16] \quad (2)$$

式中  $u, v, x, y=0, 1, 2, 3, \dots, 7$ ,  $x, y$  代表像素范围内的空间坐标,  $u, v$  代表变换域内的坐标。

对于  $u=0$ ,  $\alpha(u)=1/\sqrt{2}$ , 否则为 1;

对于  $v=0$ ,  $\alpha(v)=1/\sqrt{2}$ , 否则为 1。

## 3 H.264 的变换和量化原理

H.264 协议中的变换方式主要有 3 种: 4×4 残留变换, 4×4 亮度直流系数变换 (16×16 帧内模式下), 2×2 色度直流系数变换。H.264 协议中的量化采用分级量化原理。

### 3.1 4×4 点 DCT 变换的演变

4×4 的 DCT 正向变换如下

$$Y = AXA^T = \begin{bmatrix} a & a & a & a \\ b & c & -c & -b \\ a & -a & -a & a \\ c & -b & b & -c \end{bmatrix} [X] \begin{bmatrix} a & b & a & c \\ a & c & -a & -b \\ a & -c & -a & b \\ a & -b & a & -c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{式中 } a = \frac{1}{2}; b = \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{8}\right); c = \sqrt{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{3\pi}{8}\right)。$$

(2) 式可由 (4) 式代替<sup>[2]</sup>

$$Y = (CXC^T) \otimes E = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & d & -d & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ d & -1 & 1 & -d \end{bmatrix} [X] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & d \\ 1 & d & -1 & -1 \\ 1 & -d & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -d \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中 } a = \frac{1}{2}; b = \sqrt{\frac{2}{5}}; d = \frac{1}{2}。$$

在 (4) 式中  $CXC^T$  是核心变换,  $E$  是系数因子矩阵, 运算符号  $\otimes$  表示  $(CXC^T)$  矩阵中的每个元素和  $E$  中的同一位置的元素相乘 (和矩阵的乘法不同)。

### 3.2 H.264 的 4×4 残留变换

在 (4) 式的基础之上, 经过处理, 可得到 H.264 的 4×4 残留变换的公式。

正向变换公式

$$Y = C_f X C_f^T \otimes E_f = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} [X] \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 2 \\ 1 & -2 & 1 & -1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} a^2 & ab/2 & a^2 & ab/2 \\ ab/2 & b^2/2 & ab/2 & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab/2 & b^2/4 & ab/2 & b^2/4 \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (5)$$

反向变换公式

$$X' = C_i^T (Y \otimes E_i) C_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & -1 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1/2 \end{bmatrix}$$

$$\left( [Y] \otimes \begin{bmatrix} a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1/2 & -1/2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1/2 & -1 & 1 & -1/2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $a = \frac{1}{2}$ ;  $b = \sqrt{\frac{2}{5}}$ 。

### 3.3 H.264 的 4×4 亮度直流系数变换(16×16 帧内模式下)

当宏块的编码在 16×16 帧内模式下,此时整个 16×16 块的亮度分量是由相邻像素点预测得到的。宏块的 16 个 4×4 块的直流分量组成一个 4×4 的直流系数矩阵  $X_D$ ,这个矩阵的变换采用的是离散哈达码变换(Discrete Hadamard transform, DHT)。

正向变换公式

$$Y_D = \left( \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} [X_D] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \right) / 2 \quad (7)$$

反向变换公式

$$X_{QD} = \left( \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} [Z_D] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

式中  $Z_D$  是  $Y_D$  量化后的系数矩阵;而  $X_{QD}$  经过反量化可以得到  $X'$ 。

因为在帧内编码的宏块里,大多数的能量都集中在直流系数上,这种变换有利于进一步压缩 4×4 的亮度直流信号的相关性。

### 3.4 H.264 的 2×2 色度直流系数变换

一个宏块中,每种色度分量都有 4 个 4×4 的块。每个 4×4 的块都作 4×4 的残留变换。变换后所有 4×4 块的直流系数组成一个 2×2 的块  $W_D$  要在量化前作一次离散哈达码变换。

正向变换公式

$$Y_D = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} [W_D] \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

反向变换公式

$$W_{QD} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} [Z_D] \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3.5 H.264 的量化原理

H.264 使用分级量化。正向量化公式

$$Z_{ij} = \text{round}(Y_{ij}/Q_{\text{step}}) \quad (11)$$

式中  $Y_{ij}$  是前面的作变换后的系数;  $Q_{\text{step}}$  是量化步长的大小;  $\text{round}()$  表示取整;  $Z_{ij}$  是量化后的系数。

H.264 协议中量化步长的参数  $QP$  共有 52 个,表 1 中所示的是亮度信号的量化步长  $QP_Y$  的参数表(色度信号的量化步长  $QP_{\text{chroma}}$  略有不同)。可以看出  $QP$  每增加 6,  $Q_{\text{step}}$  增加一倍;  $QP$  增加 1,  $Q_{\text{step}}$  增加

12.5%。

H.264 的反量化公式

$$Y_{ij} = Z_{ij} \times Q_{\text{step}} \quad (12)$$

表 1 H.264  $QP_Y$  量化步长

$QP$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
$Q_{\text{step}}$	0.625	0.6875	0.8125	0.875	1	1.125	1.25	1.375	1.625	1.75	2	2.25	...
$QP$	...	18	...	...	32	...	...	42	...	...	48	...	51
$Q_{\text{step}}$	...	5	...	...	20	...	...	80	...	...	160	...	224

## 4 H.264 的变换和量化过程的实现

H.264 变换采用了 16 bit 的整数算法,在没有损失精确度的情况下,避免了反变换的失配问题。在量化过程中还可有机结合变换中的系数矩阵,使得变换过程中不再出现小数乘法问题,并且在量化过程中巧妙地回避了除法运算。图 1 是 H.264 正向变换量化和反变换反量化的实现框图。

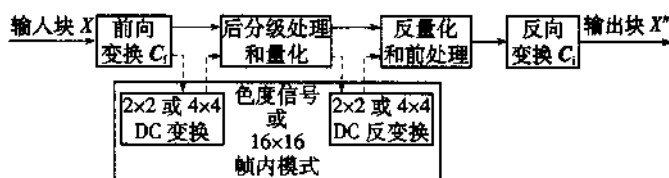


图 1 H.264 的正向变换量化和反变换反量化实现框图

下面是具体实现的步骤:

#### (1) 编码端

##### ① 输入的 4×4 的块作前向变换

$$W = C_f X C_f^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} [X] \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 2 \\ 1 & -2 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

##### ② 后分级处理和量化

$$|Z_{ij}| = (|W_{ij}| \times MF + f) >> qbits; \text{sign}(Z_{ij}) = \text{sign}(W_{ij}) \quad (14)$$

式中  $qbits = 15 + \text{floor}(QP/6)$ ;  $MF = PF \times 2^{qbits}/Q_{\text{step}}$ ; 符号“ $>>$ ”是二进制移位的运算;帧内编码时  $f = 2^{qbits}/3$ , 帧间预测编码  $f = 2^{qbits}/6$ 。

$PF$  的取值见表 2。

表 2  $PF$  的取值

位置	$PF$
(0,0)(2,0)(0,2)(2,2)	$a^2$
(1,1)(1,3)(3,1)(3,3)	$b^2/4$
其它	$ab/2$

##### ③ 2×2 或 4×4 的直流变换

如果是 16×16 的帧内模式,则其中的直流分量作 4×4 的哈达码变换,变换公式为式(7)。

色度信号的直流分量作 2×2 的哈达码变换,变换公式为式(9)。

#### (2) 解码端

##### ① 2×2 或 4×4 的直流反变换

如果是 16×16 的帧内模式,则其中的直流分量

作 4×4 的哈达码变换,变换公式为式(8)。

色度信号的直流分量作 2×2 的哈达码反变换,变换公式为式(10)。

## ② 前分级处理和反量化

$$W_{ij}'' = Z_{ij} \times V_{ij} \times 2^{\text{floor}(QP/6)}, \text{其中 } V = Q_{\text{step}} \times PF \times 64 \quad (15)$$

## ③ 反向变换和后分级处理

$$X' = C_i^T W'' C_i =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & -1 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1/2 \end{bmatrix} [Y] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1/2 & -1/2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1/2 & -1 & 1 & -1/2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

后分级处理,公式(15)有对每个系数均乘了 64,这里去除,有

$$X'' = \text{round}(X'/64)$$

以上是 H.264 的变换量化和反变换反量化过程,和先前标准的 8×8 的 DCT 变换和量化相比有以下几个特点:

### (1) 方块效应的减少

方块效应是指变换和量化后,由于高频系数的损失造成的图像细节分量的丢失。H.264 采用 4×4 的变换和先前标准 8×8 的 DCT 变换相比减少了方块效应。

### (2) 用整数运算实现变换和量化

整个变换和量化过程使用 16 bit 的整数运算和移位运算,避免了复杂的浮点数运算和除法运算。

### (3) 压缩效率的提高

H.264 变换和量化中,对直流分量进行了特殊的处理:对色度信号的直流分量进行 2×2 的哈达码变换;对 16×16 帧内模式下宏块的直流分量作了 4×4 的哈达码变换。通过这些手段,进一步压缩了图像信息的冗余度,提高了压缩效率。

## 5 结论

本文对 H.264 协议中的变换和量化从原理到实现作了分析。从总体上看 H.264 协议采用了新型的 4×4 的整数变换编码,在量化过程中结合了变换系数,使得量化和变换具有更好的效果和更高的压缩效率。H.264 作为一个更加有效的新视频压缩标准,从无线 3G 网络、数字电视,到 IP 网络,媒体的存储格式,它将有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10 AVC-2003), 7<sup>th</sup> Meeting: Pattaya, Thailand.
- [2] Hallapuro A, Karczewicz M. Low complexity transform and quantization-part1: Basic Implementation, JVT document JVT-B038, 2001(2).
- [3] Malvar Henrique, Hallapuro Antti, Karczewicz Marta, et al. Low Complexity Transform and Quantization with 16-bit Arithmetic for H.26L. IEEE International Conference on Image Processing, Rochester, NY, 2002(9).
- [4] H.264/MPEG-4 Part 10 White Paper-Transform & Quantization. Available at www.vcodex.com
- [5] 曾昭平,马仲华,张文军. H.26L 中的变换编码和量化的原理与分析[J]. 通信学报, 2002(2).
- [6] 章毓晋. 图像工程(上册)——图像处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,1999.

作者简介:

干宗良,硕士研究生,目前研究方向为图像通信、视频压缩编码技术;

李晓蕾,女,硕士研究生,目前研究方向为图像编码、视频传输技术。

责任编辑:刘伯义

收稿日期:2003-09-18

(上接第 6 页)

丁 嵘,博士后研究生,主要从事流媒体技术的研究;

尹亚光,博士研究生,主要从事流媒体技术的研究;

戴琼海,清华大学副教授,主要从事流媒体技术研究。

责任编辑:蔡国良

收稿日期:2003-07-24

## 中国 IPv6 应用服务研讨会在京召开

由天地互连信息技术有限公司与信息产业部电信研究院共同组织的 IPv6 系列研讨会之二,于 11 月 26 日在北京召开。会议旨在探讨如何提供基于 IPv6 网络基础之上的应用与服务,以及如何从现有 IPv4 网络向 IPv6 网络演进,为即将展开的大规模 IPv6 网络建设提供有益、可借鉴的思路。

来自政府主管部门的领导、国内外的著名专家及厂商代表作了报告。邬贺铨从我国通信产业发展的战略高度对我国发展 IPv6 的战略构想进行阐述,蒋林涛指出我国运营商必须加速这方面的研究,加大力度推广 IPv6 的建设与应用,雷震洲认为建设基于 IPv6 的下一代网络是重要的战略发展方向。从全局观点看,IPv6 也许比 3G 更为重要的一次机遇,并呼吁我国应该尽快明确发展的整体思路与策略,并制定相应的时间表与实施规划。Latif Ladid 先生阐述了 IPv6 出色的安全机制对于国家战略安全的重要意义,还特别强调了 IPv6 的安全机制对于人类未来生活的深刻意义;日立公司就如何构建可盈利、可管理的 IPv6 网络提出了自己的独到见解;有的代表还介绍了 IPv6 的应用及服务。

据悉,国家 863 计划还将继续积极开展 IPv6 方面的关键技术研究;中国电信已制定了《IPv6 总体技术方案》,进行了 IPv6 各项基本技术的实验和测试工作;TNet 正与运营商合作构建我国首个 IPv6 智能小区。

IPv6 是网络基础协议和核心技术,其本身并不能实现价值。它的发展必须借助其它平台,在此基础上进行丰富的应用与服务,其所蕴涵的商业价值和社会价值才得以实现。本次会议必将进一步推动基于 IPv6 的应用开发。