

应用形态滤波器的高保真子波图象编码

张承萃 杨长生

(浙江大学计算机系系统工程研究所 杭州 310027)

摘要 随着网络多媒体和数字图象通信的发展,数据量越来越庞大,对图象的高保真实时传输要求也越来越高。而传统的 JPEG 算法,存在算法复杂、抗通道错误能力差等弱点,不太适合于图象的实时传输。本文推荐了一种能高品质重建的形态滤波器子波分解法。这种分解法具有实时性较好、通道错误不扩散的特点;用这种分解重建的图象与传统线性子波分解法相比,不会受振铃效应 (ring effect) 的影响。与 JPEG 的比较则显示:该方法在高保真压缩 (压缩率约 4 倍) 的情况下, PSNR 和视觉效果接近 JPEG,而在复杂度、抗通道错误鲁棒性方面则明显优于 JPEG。

关键词 压缩 图象 子波编码 形态 滤波器

1 简介

近年来,无论是卫星遥感技术还是网络多媒体的发展,都具有信息量大、传输实时性和质量要求高及抗通道错要求高的特点,如对于星上遥感数据的高保真实时压缩及传输,就是一个十分迫切的任务。而目前的许多图象编码算法,如 JPEG^[1]、PCM^[2]等,它们在图象的压缩存储和传输中有着广泛的应用,并且对大部分图象具有良好的效果。但这些算法普遍存在算法复杂、鲁棒性 (抗通道错误能力) 差的缺点。子带编码 (Subband coding) 最早由 Crochiere 等提出并应用于语音编码。其基本思想是将信号分解为若干个频带内的分量之和,然后对不同的频带根据其不同的分布特性采取不同的压缩方案。该方案有两个明显的优点:①某一频带内的编/解码错误不会扩散到其它频带;②通过改变不同带内的比特分配方案,我们可以使总的噪声谱分布同人眼的主观感受达到较好的匹配。1986 年 J. W. Woods 和 O. Neil^[3]首次将子带编码技术引入图象编码中,并导出了相应的分析/合成结构。在分析/综合器的设计上,普遍采用的是正交镜像滤波器 (QMF),它不可避免地需要浮点卷积操作,并且为了使滤波后的子带图象同原始图象尺寸相等,均以圆卷积代替线性卷积,这又给滤波器阶数及子带分割级数的选择带来限制。另外,由于线性滤波器本身的特性,所有已知的子波编码方法都存在振铃效应 (ring effect) 失真,这种效应在高对比度的轮廓周围可见,很令人头疼。虽然可用适当的子波滤波器设计来减弱振铃效应,但不可能找到绝对无振铃效应的子波滤波器。

为避免这种人为的失误并减小复杂度,提出了形态滤波器分解法。规范的形态分解法是多分辨率分析^[5,6]。该方法将图象分解成不同的子图,每个子图都包含特定尺度的对象。图象的剩余部分可简单地由一

个打开一关闭的级联获得。通过将所有分辨率的子图‘加’到一起就可获得满意的重建效果。然而,其最大的缺陷 (对于编码来说) 在于没有采取任何子抽样,因此所有的子图与原图具有同一尺寸。另一种方法是金字塔分解^[4]。它与多分辨率分析差不多,仅一个差别:即每次打开-关闭后都进行一次子抽样。为了保证良好的重建性能,将累计误差反馈给先前的子图。尽管子抽样过程能增大分解的编码增益,但它仍不能与线性子波编码相比,因为后者采用了严格的抽样。本文采用了一种新的分解法,它采用了严格的形态滤波器阵列,这种形态滤波器阵列优于线性子波编码之处在于没有任何振铃效应,并且复杂度大为降低。

2 形态子波分解 MSD (Morphological Subband Decomposition)

线性滤波器将原图分解成若干个子波,分解后的图象仍需要与原图同样数目的象素。这样一种分解可能用形态滤波器吗? 答案似乎是‘否’^[5,4]。但没有证据表明设计相应的形态滤波器阵列不可能的。主要的困难,是因为形态抽样定理并未给我们提供对形态滤波器进行严格抽样和完美重建的工具。实际上,即使采用类如打开-关闭滤波器之类较好的形态低通滤波器,仍然无法对一幅图象减抽样并完美重建。问题在于形态滤波器会在不模糊大对象轮廓的情况下消去较小的对象。这意味着高频率的信息将始终保持在经形态滤波后的图象中,因此将会因混叠而使原图象无法完美重建。注意到减抽样实际上是一种线性的现象,应用抽样定理的频率分析很容易描述它。但是,频率概念是一个严格的线性概念,不能简单地用于形态信号处理中。

A 滤波器阵列 (Filter Bank)

为了有一个能推广到非线性情况的工具。我们采用半波滤波器的概念。其定义如下:

定义 1 一个线性滤波器叫做半波滤波器,如果:

收稿日期:1998 年 10 月 12 日

它的脉冲响应的每个奇抽样 $g(k) = 0$, 只除了一个抽样 $g(\delta)$, 即

$$g(2l+1) = \begin{cases} 1/2 & 2l+1 = \delta, l = 0, 1, 2, \dots, L-1/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} / L \text{ 是半波滤波器 } g(k) \text{ 的长度} \quad (1)$$

假设一个信号量 $x(k)$ 被先减抽样再增抽样(以 2 为因子), 将此信号称为 $y(k)$ 。然后再用一个半波滤波器 $h(k)$ 滤波(见图 2)。

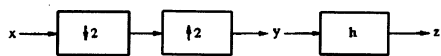


图 2 信号经减抽样, 增抽样后再经半波滤波器滤波

让我们定义 $z(k)$ 为 $y(k)$ 与 $h(k)$ 的卷积。

$$z(k) = y(k) * h(k) \quad (2)$$

然后, 每隔一个 $z(k)$ 的抽样由下式决定:

$$z(2k) = 1/2(x(2k)) \quad (3)$$

对这些像素, 输入未经过处理(除了一个 1/2 因子)。注意(3)隐含了(1)。进而, (3)给予我们将半波滤波器概念推广到非线性情况的可能性。

定义 2: 考虑一个输入信号 $x(k)$, 它被先后以因子 2 减抽样和增抽样, 得到 $y(k)$ 。而一个非线性滤波器称做是半波滤波器, 如果: 每隔一个经滤波的信号 $y(k)$ 的抽样, 它与原序列 $x(k)$ 相同。定义 $Hy(k)$ 是非线性半波滤波器的输出, 那么

$$Hy(2k) = cx(2k) \dots [c \text{ 是一个任意常数}] \quad (4)$$

注意: 如果选择适当的支持域, 那么象衰减(erosion), 膨胀或中间滤波器等非线性滤波器是可以满足条件的。

在图 3 中, 如果 $h_1(k)$ 和 $g_1(k)$ 的卷积是一个半波滤波器并且如果这些滤波器遵从 $H_2(z) = G_1(-z)$ 和 $G_2(z) = -H_1(-z)$ 的二元正交条件^[8]的话, 那么图 3 所示的二波滤波器阵列就能达到完美的重建。现在, 假设 $H_1(z) = 1$ 。则如果 $G_2(z) = -1$, $G_1(z)$ 是一个半波滤波器且 $H_2(z) = G_1(-z)$ 的话就能完美重建(见图 4)。这种情况现可推广到非线性情况。

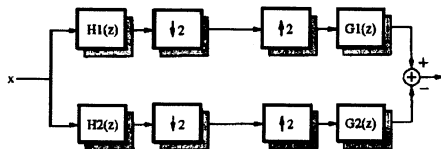


图 3 两波段分析/合成系统

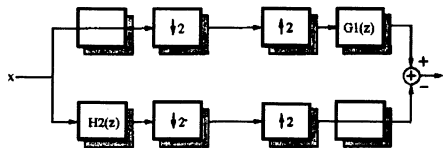


图 4 当 $G_1(z)$ 为半波滤波器时, 可完美重建的滤波器阵列示例

让我们将滤波器 $G_1(z)$ 换为一个通用的半波滤波

器 $M()$, 显然不可能用它的 z - 变换来描述这个滤波器, 因为我们现在处理的是一个非线性滤波器。然而, 从线性滤波器阵列的二元正交条件来看, $H_2(z) = G_1(-z)$ 导致完美重建是已知的。为了在非线性情况下寻找相应的高通分析滤波器, 我们可以分析一下一个线性半波滤波器的变量 z 为负意味着什么。再考虑一个半波滤波器的脉冲响应, 其每隔一个抽样为 0 (除了中间抽样)。现在, 使变量 z 为负将对脉冲响应有以下影响: 由于每个奇抽样都为 0, z 变量取负只对中间抽样有影响。因此以下等式代表了一种 0 相位半波滤波器:

$$Z^{-1}\{G(-Z)\} = (-1)^k g(k) \quad (5)$$

$$G(-Z) = 1 - G(Z) \quad (6)$$

这一等式现在可以推广到非线性情况^[10], 指定 $A()$ 为非线性高通分析滤波器。则

$$A = I - M \quad (7)$$

这里 I 是全同操作。这个非线性滤波器阵列可以对图象完美重建(见图 5)。虽然这个滤波器阵列是一个特例, 但它否定了认为形态滤波器阵列一般不能完美重建的断言。

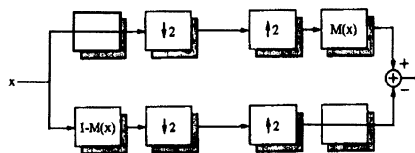


图 5 可完美重建的形态滤波器阵列, 其中 $M(x)$ 为通用半波滤波器

将低通分析滤波器作为全同操作将会在经减抽样的低通子波中引入混叠。然而, 由于低通滤波器的频率响应很差, 因此即使是象不对称滤波器阵列(AFB)这样好的子波滤波器也有类似的缺点。对图象压缩来说, 最要紧的是低通合成滤波器的动作, 因为它对滤波介入的量化噪声和振铃效应负主要责任。用这种滤波器阵列, 我们可以完全控制低通合成滤波器。方法是在合成阶段, 用一个形态滤波器将完全消除振铃效应; 并且经分解后的子波用与原图同数目的像素来表现原图。

B MSD 的编码增益

让我们算一下 MSD 的联合编码增益。首先, 由 KAT TOD 的通用形式:

$$G_{SBC} = \frac{\sigma_m^2}{M^{-1} \sum_{i=0}^{M-1} (\sigma_i^2 \sum_{k=0}^{L-1} g_i^2(k)) \alpha_i} \quad (8)$$

这里 σ_m^2 是输入图象的方差, σ_i^2 是第 i 个子波的方差, $g_i(k)$ 是第 i 个合成滤波器的脉冲响应, α_i 是第 i 个减抽样因子而 M 是子波个数。在我们的例子中, 使 $M=2$ 且 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1/2$ 。现在, 由于我们处理的是形态滤波器, 不可能只用 $\sum_{k=0}^{L-1} g_i^2(k)$ 给予波方差加权来直接计算编码增益。由于这一形式表示了经减抽样和合成滤波后子波的方差, 因此我们只用度量这个方差并



以下方方式计算编码增益即可。指定 σ_{Ri}^2 为子波在图 5 中经加合前的方差。那么编码增益就要变成：

$$G_{SBC} = \frac{\sigma_{In}^2}{\sqrt{\sigma_{R1}^2 \cdot \sigma_{R2}^2}} \quad (9)$$

C 形态子波滤波器的设计

子波分解中最重要的一环在于滤波器的设计。形态滤波器的设计与优化线性滤波器系数的问题迥然不同。实际上,形态滤波器是不能被优化的,因为只有有限的可能解决方式。最流行的形态滤波器是 rank - order 滤波器。这种滤波器有两个自由度:所用的 rank (序),以及构成元素的支持域。设计过程是相当简单的,我们只用通过比较他们在自然图象上的效果来选择最可行的方式。

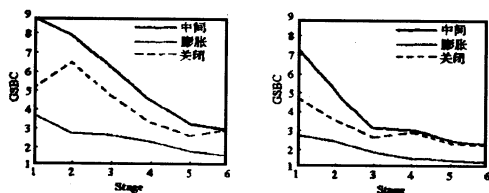


图 6 不同形态滤波器在每一步的编码增益 (左)“LENA”,(右)“PTGL”

让我们考虑一个树结构的分解,既然高通子波已不再处理了,那么每个低通子波被进一步分解成树状,对低通子波的每个分解而言,可算出编码增益。它随着进一步的分解而减少。这意味着在某一点后就不值得再分解了,一个好的滤波器在每一步都有较好的编码增益。图 6 列出了三种形态滤波器:膨胀,关闭和中间滤波器的比较。其中两种为数字形态采样定理所川^[7],即膨胀和关闭,中间滤波器有一个 6 个样本的支持域。左边的曲线图是分解“LENA”得到的编码增益,右边的则由“PTGL”得到。很清楚,中间滤波器优于其它两种。而且,可以证明编码增益随着阶段深入而降低。

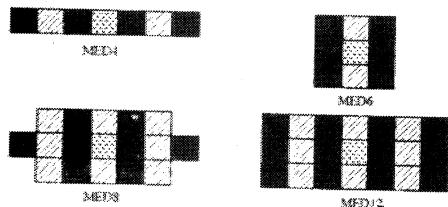


图 7 不同中间形态滤波器的支持域及标号。其中黑象素属于低频子波,正中打点的象素为重建设象素,其他画斜线的象素被滤掉

现在,来比较不同支持域的中间滤波器。图 7 显示了他们的支持域及标号 (MED6 是上述比较时用过的滤波器)。图 8 则表明该滤波器是最适合这种子波结构的。

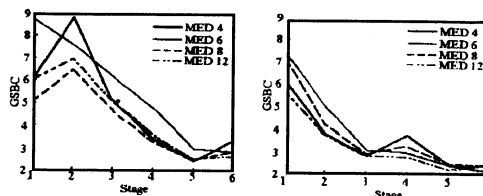


图 8 不同中间形态滤波器在每一步的编码增益。(左)“LENA”,(右)“PTGL”

正如以前所提及的,每一阶段的编码增益随阶段的深入而减少。应在哪一步停止分解?我们必须注意还有另一个重要因素的存在。实际上,对于包含所有低频成分的子波应采用降噪滤波器,但如果处理图象太小则降噪效果不明显。所以,在分解的所允许的最小的子波是 64 * 64 大小,对于线性子波编码也一样。既是说,256 * 256 的图象要经四步分解,产生五幅子波,而 512 * 512 图则分解为 7 个子波。图 9 显示了 7 子波分解的一个实例(“LENA”)。而用经典的八开子波分解所获得的编码增益的少许增加并不能抵销额外的计算耗费。

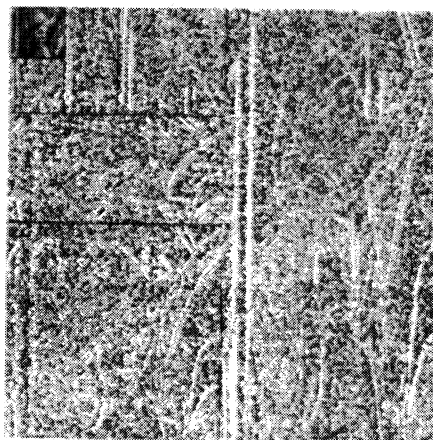


图 9 “LENA”的 7 子波分解示例

在编码效率上本文分解法优于其它形态分解^[2,4],这主要是由于其它分解没采取严格的减抽样。以金字塔分解为例,在同等压缩比下一般比本文分解法低 5~8 个 db。

3 结果和比较

A 客观质量评价标准

图象的质量很难定量地评价。事实上,最好的仪器就是人眼。毕竟,人眼能自动看出一幅图中不同区域的差别。进而,它的敏感度随频率而异。为了有一个定量的标准,信噪比峰值:

$$P_{SNR} = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\sigma_c^2} \quad (10)$$

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (11)$$



$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (12)$$

x_i 是原图的抽样, \hat{x}_i 是重建图象的同一抽样, N 是该类型的像素个数。

B 与标准编码方式的比较

本文所述的编码方案描述如下:

用图 5 所示的形态滤波器阵列来进行子波分解。

在最低子波中应用了降噪装置。

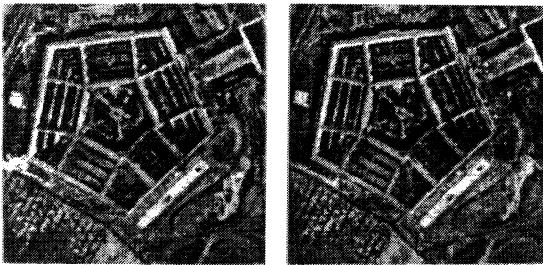
带优化的比特分配的均匀量化^[9]。

经量化的子波用自适应算术编码和 ORDER - 1 模型^[8]编码。



Lena (MSD 压缩)

Lena (JPEG 压缩)



ptgl (MSD 压缩)

ptgl (JPEG 压缩)

这一方案将与已知的编码方法 JPEG 比较。实验中对两幅图象用 MSD 和 JPEG 做了压缩比大致相同的压缩。由图可见, MSD 的恢复图象中没有振铃效应, 并且重建质量与 JPEG 无显著差异(见表 1)。而且, 由于该方案将低频成分保持得相当好, 又是分别对每个子波编码, 因此可防止误码扩散, 甚至在损失大量高频信息的情况下都能使重建质量达到人眼可接受的程度。

表 1

算法	实验图象	RMSE	PSNR	比特率
MSD	Lena	3.374	37.566	1.982
	Ptgl	8.888	29.155	2.011
JPEG	Lena	2.218	41.213	2.015
	Ptgl	7.943	30.131	2.012

4 算法分析

无论是与 JPEG 还是传统的 QMF 子波分解相比, MSD 算法都具有时间复杂度低的优点, 若图象大小为

$n \times n$, 则其时间复杂度仅为 $O(C(n \times n))$, 而 JPEG 的时间复杂度为 $O(n^2 \times n^2)$ 。在此, 我们将比较每个像素点所需的操作, MSD、QMF 与 JPEG 比较见表 2。

表 2

算法	乘除运算/pixel	加减运算/pixel	三角运算
MSD	0.98	9.91	0
JPEG	128	64	128
QMF	32	34	0

由表 2 可知, JPEG 算法的平均每个像素所需的乘除运算、加减运算及三角运算都要远远高于 MSD 压缩算法, 并且 JPEG 所用的编码书远比本算法的编码书复杂, 其用于查找编码书的时间也比本算法所用的时间多。

5 结论

本文讲述了一种应用形态滤波器的图象压缩技术。与传统子波编码方法所不同的是, 它无振铃效应; 与一般的形态分解不同的是, 它采用了严格的子抽样, 从而使子波之和与原图大小相同。

实验结果表明, 本文的 MSD 算法与 JPEG 等算法相比, 其优势在于:

客观质量较好, 在 4 倍左右压缩率下, PSNR 与 JPEG 差别不大。

主观效果好。实际上, 当编码率进一步降低的时候, MSD 在图象景物边缘处的量化噪声看起来不那么讨厌, 而且没有变换编码的块效应。并且通过改变不同带内的比特分配方案, 可以使总的噪声谱分布同人眼的主观感觉达到较好的匹配。

复杂度大大低于 JPEG。

有利于逐步浮现传输方式的实施。先传输并重建低频子带图象, 再逐步将代表细节的高频子带图象添加上去, 使恢复图象渐渐清晰。由于高频子带数据的丢失一般不至于严重影响对图象内容的本质理解, 并且由于某一频带内的编/解码错误不会扩散到其它频带, 因此 MSD 具有的这种可丢失结构, 在未来的 B - ISDN 以及分组 ATM (异步传输模式) 网中作为一种编码方式特别引人注目。

适宜于“多分辨率”(multiresolution) 设备与系统。为了适应不同分辨率的图象 I/O 设备和不同传输速率的通信系统, 或者为了提高图象数据库中对于编码图象的存取与处理效率, 常希望编码图象的分辨率在不同的图象尺寸之间相互转换。例如基于四叉树 (quad - tree) 数据结构的高质量压缩与无失真压缩法。不难理解, 对于在水平与垂直方向均以不断二分来表示的子带分解, 其结构也是一棵四叉树。因此, 子带分解的思想对于图象的多分辨率表示具有典型意义, 更新更好的小波变换编码亦未能出此表示框架。

参考文献

- 1 W. Pennebaker, "JPEG Technical Specification, Revision 8", Working Document No. JTC1/SC2/WG10/JPEG - 150 (1988)

- 2 S. P. Floyd, "Least square quantizing in PCM", Bell Lab Meno, July 1957
- 3 John W. Woods and Sean D. O'Neil, "SUB - BAND CODING OF IMAGES", ICASSP 86
- 4 A. Toet. "A Morphological pyramid image decomposition," patt. Recog. Lett., 1989
- 5 Z. Zhou and A. N. Venetsanopoulos, "Morphological methods in image coding," Proc. Int. Conf. On ASSP, vol. 3, 1992
- 6 P. Salembier and M. Kunt, "Size - sensitive multiresolution decomposition of images with rank order based filters," Signal Processing, vol. 27, 1992
- 7 R. M. Haralick, X. Zhuang, and J. Lee, "The digital morphological sampling theorem," IEEE Trans. ASSP, vol. 37, 1989
- 8 I. H. Witten, R. M. Neal, and J. G. Cleary, "Arithmetic coding for data compression," Commun. ACM, vol. 30, 1987
- 9 P. H. Westerink, J. Biemond, and D. E. Boeckee, "An optimal bit allocation algorithm for subband coding," Proc. Int. Conf. on ASSP, 1988
- 10 Olivier Egger, Wei Li, and Murat Kunt, "High Compression Image Coding Using an Adaptive Morphological Subband Decomposition", IEEE Proceedings vol. 83, 1995

一种降低甚低速视频编码块效应影响的方法

张晓芬 黄广连

(湖南长沙国防科技大学电子技术系 410073)

摘要 在甚低速视频编码过程中(编码速率低于 16 Kb/s),块效应现象非常明显,严重影响图象质量。本文介绍一种基于人类视觉系统的感觉加权量化方法。将该方法用于 H. 263 甚低速视频编码的实验结果表明该方法可有效地抑制块效应,提高图象主观感觉质量。

关键词 甚低速视频编码 块效应 人类视觉系统特性

1 引言

随着社会对高清晰电视、视频会议、可视电话、医疗成像、虚拟现实等应用需求的增加,视频编码技术发展日新月异,各种视频编码标准相继涌现,而处于实用阶段的低速视频编码标准主要是 ITU - T(International Telecommunication Union - Telecommunication Sector)制定的 H. 263 编码草案^[1],其目标是为实现速率低于 64 Kb/s 的视频编码。在具体应用的过程中,H. 263 对于速率为 64 Kb/s 的视频编码取得了比较理想的结果,但速率低于 16 Kb/s(即甚低速视频编码)时,重建图象效果不尽人意。其中尤以块效应影响严重,导致主观感觉质量不高。

本文在实现了 H. 263 的基础上,首先分析了 H. 263 编码器在甚低速视频编码中块效应的影响的原因,然后提出了基于人类视觉系统特性的感觉加权量化方法,即在 DCT 系数量化之前引入视觉量化矩阵加权,实验证明重建图象主、客观质量都得到了提高,尤其是主观评价质量提高更为显著。

2 甚低速视频编码中的块效应

块效应影响在采用 DCT 变换技术的甚低速视频编码器中很常见,它是影响重建图象质量的重要因素,其产生的原因在于:在甚低速视频编码中为了获得低比特率的编码输出,采用较大的量化因子 QP,并且没有考虑到不同 DCT 系数对于视觉作用程度的不同,而

对 DCT 系数的高频部分进行截断,对低频部分进行较粗的量化。

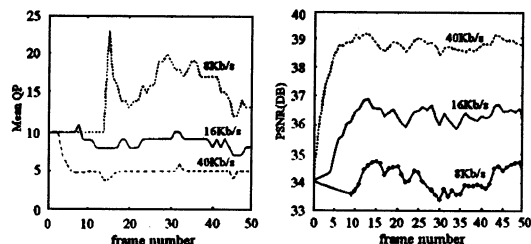


图1 量化因子(QP) 图2 H. 263 在三种速率下重建图象信噪比曲线

H. 263 是基于预测变换编码技术的视频编码方案,在仿真的过程中,我们采用了标准视频图象 Miss Americ(QCIF, 176x144)作为输入图象源。在此我们着重分析恒定比特率、恒定帧率的 H. 263 编码器性能。恒定比特率是通过调整量化因子 QP 来实现的,QP 值随着图象内容的变化而变化,QP 值的大小决定了 DCT 系数量化步长,进而决定了量化误差的大小。由于 H. 263 中 DCT 量化采用均匀量化,因而较大的 QP 值将抛弃更多的高频分量,低频分量又进行较粗的量化,导致量化误差增大,重建图象信噪比降低,块效应明显。H. 263 中规定 QP 值范围是^[1~31],从图 1 可见,H. 263 在速率为 16 Kb/s, 40 Kb/s 的编码过程中,即使对变化较快的帧,QP 值波动很小,但对于甚低速(8 Kb/s)编码器,由于编码比特数限制得很低,QP 值随着图象的变化波动就变得很大了。图 2 是测试序列在恒定帧率

收稿日期:1998 年 10 月 12 日