

H. 264标准量化的16位算法^{*})

张 剑

(华中科技大学计算机科学与技术学院 武汉430074)

摘 要 本文是基于 Henrique Malvar 的16位算法,新一代视频压缩 H. 264标准中变换和量化计算的优化。它不同于以往的离散余弦变换(DCT),该算法能通过整型变换精确地进行计算,在执行变换系数量化过程中,不需要进行除法运算,只进行加法和移位运算,这样避免逆转变使配合不当问题,使算法简单易实现,运算精度高、速度快,占用内存小。最后给出了程序实施变换编码过程。

关键词 H. 264标准,变换和量化,16位量化

Quantization with 16-BIT Arithmetic for H. 26L

ZHANG Jian

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract On the base of Henrique Malvar 16-bit algorithm, this paper presents an improved transform and quantization method for H. 264, the new-generation video compress standard. Unlike the popular discrete cosine transform (DCT) used in previous standards, the transforms in H. 264 can be computed exactly in integer arithmetic, thus avoiding inverse transform mismatch problems. The new transforms can also be computed without division, just additions and shifts, facilitate the implementation of the algorithm with features of high compute accuracy, fast compute speed, low memory requirement. Finally this paper gives an implement of the transform coding.

Keywords H. 264, Transform and quantization, With 16-BIT arithmetic

1 引言

H. 264在变换系数量化方面与先前的标准相似,使用了类似于 8×8 的离散余弦变换(DCT)的变换^[1,2],但使用的是以

整数为基础的空间变换,是整数操作而不是实数运算,不需要进行除法运算^[3]。本文量化系数和比例因子的16位算法计算变换时,选择了自适应块大小变换,对误差采用基于 4×4 块的变换编码,如图1所示。

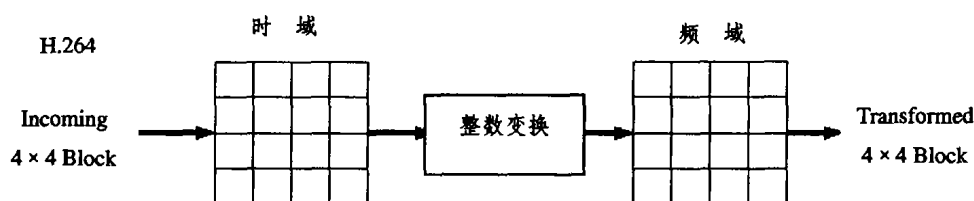


图1 整数变换

由于用于变换块的尺寸缩小,运动物体的划分更精确,这样,不但变换计算量比较小,而且在运动物体边缘处的衔接误差也大为减小,也不存在反变换因为取舍而存在误差问题^[4]。为了使小尺寸块的变换方式对图像中较大面积的平滑区域不产生块之间的灰度差异,可对帧内宏块亮度数据的16个 4×4 块的DC系数(每个小块1个,共16个)进行第二次 4×4 块的变换,对色度数据的4个 4×4 块的DC系数(每个小块1个,共4个)进行 2×2 块的变换,如图2所示。

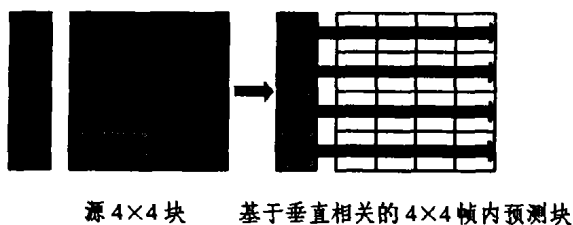


图2 H. 264帧内预测

这种方法的优点在于:在编码器和解码器中允许精度相同的变换和反变换,便于使用简单的定点运算方式。也就是说,这里没有“反变换误差”。有助于提高编码效率,甚至优于图片编码器的压缩率^[5,6]。

2 变换系数量化

量化是为了将亮度、色度的频率系数,除以量化矩阵的值,取得与商数最近的整数(将频率系数由浮点数转变为整数),进入编码阶段提高压缩率,而引入信号损耗的有损压缩。

对于给定 Q ,通常为一整数,编码器通过下列公式来执行量化:

$$X_q(i, j) = \text{sign}\{X(i, j)\} (|X(i, j)| + f(Q_{step})) / Q_{step} \quad (1)$$

解码器通过以下公式缩放数据执行逆量化:

$$X_r(i, j) = Q_{step} X_q(i, j) \quad (2)$$

其中, $X_q(i, j)$ 是量化器的系数, i 和 j 是行号和列号的变换系

^{*} 本课题得到全国教育科学十五规划重点课题(NO: AYA010034)和国家自然科学基金(NO. 69735020)资助。张 剑 博士研究生,副教授,高级工程师,研究方向:计算机多媒体视步压缩算法及其实现。

数, Q_{step} 是量化器的步幅大小, $f(Q)$ 是控制量化的频率区域。公式(1)的缺点是它在编码器量化时, 需要整数除法, 为了避免除法和浮点运算, 由文[7]先前的 H. 26L 用下面的式来取代公式(1)。

$$X_q(i, j) = \text{sign}\{X(i, j)\}(|X(i, j)| (A(Q) + f^2)) \gg L \quad (3)$$

$$X_r(i, j) = X_q(i, j) B(Q) \quad (4)$$

$$X_r = (H^T X_r + 2^{N-1} e) \gg N \quad (5)$$

其中, 量化表 $A(Q)$ 和重建表 $B(Q)$ 中的整数必须满足:

$$A(Q) B(Q) G^2 = 2^{L+N} \quad (6)$$

其中, G 是 H 中行的正交规范。 $e = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 。新变量 Q 是从 0 到 Q_{max} 变化, 量化参数 $A(Q)$ 和 $B(Q)$ 的联合以至于 0 相应于精确量化; Q_{max} 相应于粗糙量化。这样, 变量 Q_{max} 的选择要有足够的间隔尺度, 如文[2]中提到的 H. 26L $Q_{max} = 31$ 。在式(3)中分别用 L 位和 N 位右移与 $2L$ 和 $2N$ 分解是等价的, 所以避免了除法运算, 但是 L 值和 N 值的选取需要一个折衷方案, 使大值降低近似误差, 而小值降低 X_r 和 $|X(i, j)| A(Q)$ 的动态范围, 先前的 H. 26L 方案^[2], $L = N = 20$, 该值已足够能保持所有变量 f , 在 32 位范围内的整数 f , AB 所产生的误差可以忽略。

注意: 区域控制了变量 f , 不同的编码器 f , 它可以设定不同的值, 它的典型值范围是 $1/6 \sim 1/2$ 。

3 量化的 16 位算法

根据式(3)运用 16 位算法, 来进一步简化执行的难度, 对信噪比没有影响。为了达到这个目的, 减小 $B(Q)$ 的值和参数 L, N 。由(3)、(4)、(5)得到最初 H. 26L 量化的另一方案: Q 值增加 1, 则 Q_{step} 增加 12.5%; Q 值每增加 6 时, Q_{step} 值则近似指数比例变化, Q_{step} 值大约是成倍增加。量化器步幅大小的宽行列式保证了编码器的精确度, 同时还灵活控制比特速率和品质的平衡性, 这就使得信噪比 $PSNR$ 和参数 Q 的控制度近似为线性关系。见表 1 所示, 列出 52 个对应于每个量化参数 Q 的寻址所得标准 Q_{step} 值。

表 1 H. 264 编码中的量化器步幅

Q	0	1	6	12	18	24	30	36	42	48	51
Q_{step}	0.625	0.6875	-1.25	-2.5	-5	-10	-20	-40	-80	-160	-224

$$Y = C_f X_f C^T \otimes E_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 2 \\ 1 & -2 & 1 & -2 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} a^2 & ab/2 & a^2 & ab/2 \\ ab/2 & b^2/4 & ab/2 & b^2/4 \\ a^2 & ab/2 & a^2 & ab/2 \\ ab/2 & b^2/4 & ab/2 & b^2/4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过这种方法, H 矩阵中任意一行中绝对值之和最大值是 6, 所以二维变换中最大动态范围增益增大到 $\log_2(6^2) = 5.17$, 也就是说 $X(k)$ 的存储只需要比 $X(n)$ 多 6 位。在解码器中可以运用式(10)中 H 的转置矩阵, 为了减小逆变换和重建中的累积舍入误差, 我们需要减小动态范围增益, 将单相对称

$$X' = C_f^T (Y \otimes E_i) C_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & -1 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \vdots \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1/2 & -1/2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1/2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, X' 表示是 H_{inv} 的一个比例逆矩阵, 也就是:

$$H_{inv} \text{ding}\{1/4, 1/5, 1/4, 1/5\} H = I \quad (12)$$

乘以 $1/2$ 实际上是通过右移 1 位来执行的, 所以所有的解码器得到了同样的结果。右移带来的微小误差通过在逆变换输入

这里, 设每当 Q 值增加 6, 则 Q_{step} 值增加两倍, 重建量化表, 其表的大小将减小, 根据文[7]整数变换方案, 将一个长为 N 的矢量 x 通过变换系数映射成为一个新的矢量 X , 系数由一个线性变换 $X = H x$ 决定, 那么, H 的 k 行和 n 列的元素定义如下:

$$H_{kn} = H(k, n) = c_n \sqrt{\frac{2}{N}} \cos\left((n + \frac{1}{2}) \frac{k\pi}{N}\right) \quad (7)$$

其中, 频率指数 $k = 0, 1, \dots, N-1$; 采样指数 $n = 0, 1, \dots, N-1$; $C_0 = \sqrt{2}$; $C_k = 1$, 当 $k > 1$, DCT 矩阵是正交的, $X = H^{-1} X = H^T X$, 几个整数构造出一个对称的矩阵 H , 类似于 DCT, 保证正交性^[8], 例如:

$$Y = A X A^T = \begin{bmatrix} a & a & a & a \\ b & c & -c & -b \\ a & -a & -a & a \\ c & -b & b & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b & a & c \\ a & c & -a & -b \\ a & -c & -a & b \\ a & -b & a & -c \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于最初的 H. 26L 方案^[9], $a = \frac{1}{2}$, $b = \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\frac{\pi}{8})$, $c = \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\frac{3\pi}{8})$ 。这里, 选取 $a = 13$, $b = 17$ 和 $c = 7$, 因为 $2 \times 13^2 = 17^2 + 7^2$, 这将使 H 十分接近于缩放的 DCT。另外一个途径是, 在 DCT 矩阵中变换过的系数四舍五入至最接近的整数。

$$H = \text{round}\{a H_{DCT}\} \text{ 或 } H = \text{round}\{X(i, j) \frac{PF}{Q_{step}}\} \quad (9)$$

其中, H_{DCT} 是一个 DCT 矩阵, PF 取决于位置 (i, j) 。如果我们设定 $a = 26$, 将得到^[7, 10]方案完全相同的结果。如果 $\max\{|X(n)|\} = A$, 那么 $\max\{|X(k)|\} = 52A$, 总的增益是 $52^2 = 2704$, 也就是说这个变换有 52 的动态范围增益。在计算二维变换行和列时, $\log_2(2704) = 11.4$, 存储 $X(k)$ 比存储 $X(n)$ 要多 12 个位, 这样使得需要 32 位算法来计算变换和逆变换。为了克服这个限制, 本文提出, 通过在式(9)中设定 $a = 2.5$, 使变换的复杂程度进一步降低并进行移位, 使得 $\{a = 1, b = 2, c = 1\}$, 变换变成 Hadamard 变换^[4, 11], 得到:

性基本函数的比例缩放 $1/2$ 。这样, 奇函数的绝对值之和减半为 3, 对于任何基本函数的绝对值之和的最大值等于 4 (偶函数之和), $\log_2(4^2) = 4$, 动态范围从 6 位降到 4 位, 使得二维逆变换的动态范围增益从 62 降到 42。然后逆变换矩阵定义如下:

的动态范围的 2 位增益来补偿, 补偿使用 (10) 式三种不同的比例因子 $(1/42, 1/52, 1/20)$ 。H. 26L 中新的量化公式定义如下:

$$X_q(i, j) = \text{sign}\{X(i, j)\}(|X(i, j)| (A(Q_{step}, i, j) + f) /$$

$$2^{17+Q_E} \quad (13)$$

其中, $Q_E = Q \bmod 6$, $Q_E = Q/6$, 指数 Q_E 每增加1, (13)式的维数就加倍, 乘以 $|X(i, j)|$ 后的比例因子不发生改变^[12]。这种周期性使得可以定义一个范围很大的量化参数, 而不增加对内存的要求。这个量化的范围是先前的 H. 26L 方案的扩展。参数 f 依靠编码器来选择, 典型的范围是从0到 2^{16+Q_E} , 相应的重建公式如下:

$$X_r(i, j) = X_q(i, j)B(Q_M, i, j) \gg Q_E \quad (14)$$

下面用移位来取代 2^{Q_E} 的乘法, 量化因子 $A(Q_M, i, j)$ 和重建量化因子 $B(Q_M, i, j)$ 由块中的变换系数位置 (i, j) 来决定的。这就有必要补偿式(12)的二维形式中不同的比例因子, 它们的值为 $A(Q_M, i, j) = M(Q_M, r)$ 和 $B(Q_M, i, j) = S(Q_M, r)$ 。

4 数理仿真实验分析

4.1 量化

$$\text{由(9)式, 得 } H = \text{round}\{X(i, j) \frac{x_r}{2^{\text{qbts}}}\} \quad (15)$$

当 $\frac{x_r}{2^{\text{qbts}}} = \frac{PF}{Q_{step}}$, 且 $\text{qbts} = 15 + \text{floor}(Q/6)$ 时, 在整数运算中^[13], 式(15)执行如下:

$$|H| = (|X(i, j)| \cdot X_r + f) \gg \text{qbts} \quad (16)$$

$$\text{Sign}(H) = \text{sing}(x(i, j)) \quad (17)$$

其中, \gg 表示右移2位, r (乘法因数) 做乘法和右移, 用以避免除法和浮点运算。对于参考模型软件内部块 f 是 $2\text{qbts}/3$, 而对于外部块 f 是 $\text{qbts}/6$ 。

例如: $Q=4$, hence $Q_{step} = 1.0$, $(i, j) = (0, 0)$, hence $PF = a^2 = 0.25$, $\text{qbts} = 15$, hence $2^{\text{qbts}} = 32768$, $\frac{x_r}{2^{\text{qbts}}} = \frac{PF}{Q_{step}}$, hence $X_r = (32768 \times 0.25) / 1 = 8192$, PF 为 $a_2, ab/2, b_2/4$,

Position	PF
(0,0), (2,0), (0,2) or (2,2)	a^2
(1,1), (1,3), (3,1) or (3,3)	$b^2/4$
Other	$ab/2$

0, $(i, j) = \{(0, 0), (0, 2), (2, 0), (2, 2)\}$; $r = 1$, $(i, j) = \{(1, 1), (1, 3), (3, 1), (3, 3)\}$; 前6个 X_r 的值由 Q 的值和位置系数 (i, j) 确定, X_r 的乘法因子:

$$M = \begin{bmatrix} 13107 & 5243 & 8066 \\ 11916 & 4660 & 7490 \\ 10082 & 4194 & 6554 \\ 9362 & 3647 & 5825 \\ 8192 & 3355 & 5243 \\ 7282 & 2893 & 4559 \end{bmatrix} \quad (18)$$

当 $0 \leq Q \leq 5$ 时, 因数 X_r 保持不变; 而 Q 每增加6, 则除数 2qbts 就增加2。当 $6 \leq Q \leq 11$ 时, $\text{qbts} = 16$; 当 $12 \leq Q \leq 17$ 时, $\text{qbts} = 17$ 等。

4.2 逆向量化

$$\text{基本逆向量化运算是: } Y'(i, j) = H \cdot Q_{step} \quad (19)$$

为了避免逆向变换后的因子, 再运算凑整误差, 将逆向变换系数定位常数64:

$$X'(i, j) = Z(i, j) \cdot Q_{step} \cdot PF \cdot 64 \quad (20)$$

其中, $X'(i, j)$ 是逆向变换系数, 逆变换系数输出除以64后, 再移动 Rescaling 因子(该运算的执行过程只需要用到加法和右移)。因为逆量化过程是标准化的^[14], 所以可以修改向前量化, 以提高解码器的解码质量。

在 H. 264 中并没有直接指明 Q_{step} 和 PF , 当 $0 \leq Q \leq 5$ 时, $S = (Q_{step} \cdot PF \cdot 64)$ 位置系数和逆向变换运算定义如下:

$$X'(i, j) = Z(i, j) \cdot S(i, j) \cdot 2^{\text{floor}(QP/6)} \quad (21)$$

例如: $Q=3$, 当 $Q_{step} = 0.875$ and $2^{\text{floor}(QP/6)} = 1$, $(i, j) = (1, 2)$, 当 $PF = ab = 0.3162$, $S = (Q_{step} \cdot PF \cdot 64) = 0.875 \times 0.3162 \times 65 \cong 18$, $X'(i, j) = Z(i, j) \cdot S(i, j) \cdot 2^{\text{floor}(QP/6)} = Z(i, j) \times 18 \times 1$ 。

当 $0 \leq Q \leq 5$ 时, PF 为 $a_2, ab/2, b_2/4, r = 0$, $(i, j) = \{(0, 0), (0, 2), (2, 0), (2, 2)\}$; $r = 1$, $(i, j) = \{(1, 1), (1, 3), (3, 1), (3, 3)\}$; 前6个逆向变换系数 S 的值定义如下:

$$S = \begin{bmatrix} 10 & 16 & 13 \\ 11 & 18 & 14 \\ 13 & 20 & 16 \\ 14 & 23 & 18 \\ 16 & 25 & 20 \\ 18 & 29 & 23 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(21)中的因数 $2^{\text{floor}(QP/6)}$ 使 Q 每增加6对应的 Rescaling 变换结果增加2。矩阵(18)、(22)满足式(6)中的近似关系, 如下所示:

$$M(Q_M, r)S(Q_M, r)v(r) \cong 2^{21} \quad (23)$$

其中, $v(r) = \{4^2, 5^2, 4 \times 5\}$, 重建后最终的比例因子是:

$$X_r(H_{inv}X_r + 2^5e) \gg 6 \quad (24)$$

其中, $e = [1 \ 1 \ 1]^T$ 。

5 程序实施

本算法对图像数据采用基于 4×4 块的整形变换编码, 避免了取整误差问题。对亮度的变换编码通过 $\text{dct_luma}()$ 和 $\text{dct_luma2}()$ 函数实现, 首先分成 $4 \times 4 = 16$ 个 4×4 块进行变换; 提取每个块变换后的色度系数组成一个 4×4 块, 再进行变换, 然后量化输出; 接着量化输出剩余的亮度系数。恢复过程是编解码的逆过程, 首先将色度系数块反量化、反变换, 最后得到恢复图像数据, 存入图像缓冲器中。

对色度的变换编码通过 $\text{ChromaCodingP}()$ 函数实现, 首先是基于 4×4 的整形变换, 由 $\text{imtrapred_chroma}()$ 函数进行帧内预测; 再对色度系数提取的进行 2×2 的特殊变换编码; 然后通过 $\text{dct_chroma}()$ 对色度系数进行变换编码; 在帧间编码模式下对得到预测值, 通过 $\text{dct_chroma}()$ 对残差图像进行变换编码, 进行上述修正色度系数, 反量化、反变换, 恢复图像数据, 存入图像缓冲器中。具体原编码程序请跟作者联系。

结论 本文介绍了目前 H. 264 草案标准中新的变换系数量化16位算法, 这种新变换近似于 DCT 的比例整数, 它允许计算正逆变换时, 只进行加法和最少的移位运算, 而不需要进行乘法运算, 避免除法运算, 这样可以减少方块效应, 使算法简单明了, 易于实现, 从而极大地降低了计算的复杂程度。

参考文献

- 1 Wiegand T, Sullivan G. The Emerging JVT/H. 26L Video Coding Standard. Tutorial at ICIP 2002, Rochester, NY, Sept. 2002
- 2 Bjontegaard G. Response to call for proposals for H. 26L. ITU-T SG16 Doc. Q15-F-11, Oct. 1998. Available at: <ftp://standard.pictel.com/video-site>
- 3 Wiegand T. Working draft for recommendation H. 264. Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-TVCEG, Doc. JVT-C167, May 2002. Available at: <ftp://ftp.imtc-files.org/jvt-experts>.

UDP,我们在用户数据前封装了 NMAC 头,降低了数据传输的效率。

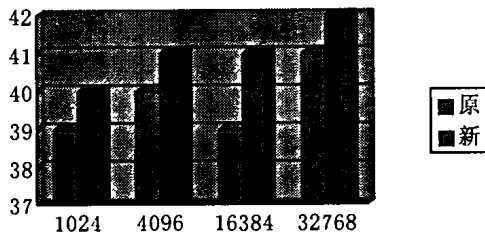


图6 UDP 层开销对比

假设,我们封装的 NMAC 头长度为 Ln ,用户的有效数据长度为 Ld ,那么引入 NMAC 头后,与未做修改的 UDP 相对传输效率为: $Ld/(Ld+Ln)$,其下降为:

$$1 - Ld/(Ld+Ln) = Ln/(Ld+Ln)$$

由此式可以知道,当 UDP 报文长度与 NMAC 头的长度相差不大时,传输效率急剧降低,这是极端的情况。但是,从网络数据报的统计来看,NMAC 头长度相对于数据报的长度还是很小的,一般不会对 UDP 的传输效率带来较大损害。

4.5.2 TCP 对 TCP 修改后与原来的测试对比结果,如图7所示。

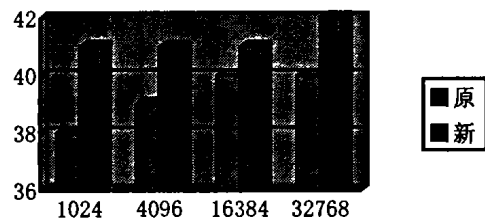


图7 TCP 层开销对比

对于 TCP 通信,在建立 TCP 连接的过程中,NMAC 数据与 SYN/ACK 请求/响应包一起发送,当通信双方建立连接后,就完成了双方 NMAC 信息的交换。测试结果表明,对 TCP 的传输性能几乎没有什么影响。所增加的时间延时是在进行多级安全策略判断时的 CPU 开销。

结语 我们感兴趣的是控制网络中主机保存的敏感信息传送,特别是合法用户之间的数据共享。许多协议需要发送双向确认信息,我们的方法不影响协议确认信息的传送,现成网络应用可以不加修改地运行,因而,极大地保证了网络应用的兼容性。能够灵活控制网络主机之间的信息按多级安全策略传送,保证信息的机密性,可以有效防止合法用户任意泄漏信息,支持复杂的信任关系,提高了网络的安全性。

参考文献

- Bell D E, Laphadula L J. Secure computer systems: Mathematical foundations. Hanscom. AFB. Bedford. MA. Rep. ESD-TR-73-278, vol. 3, ESD/AFSC. 1973
- Bell D E. Secure computer systems: A refinement of the mathematical model. Hanscom AFB. Bedford. MA. Rep. ESD-TR-73-278, vol. 3, ESD/AFSC, 1973
- Bell D E, Laphadula L J. Secure computer systems: Unified exposition and Multic interpretation. Mitre Corp., Bedford. MA. Rep. Mtr-2997, 1975
- Sidhn D P, Gasser M. A multilevel secure local area network. In: proc. of the 1982 symposium on security & privacy
- Esterin D. Non-discretionary controls for Inter-organization Networks. In: proc. of the 1985 symposium on security & privacy
- Mchugh J, Moore A P. A Security Policy and Formal Top Level Specification for a Multi-level Secure Local Area Network. In: proc. of the 1986 symposium on security & privacy
- Walker S T. Network security overview. In: proc. of the 1985 symposium on security & privacy
- Anderson D P, Rangan P V. A basic for secure communication in large distributed systems. In: proc. of the 1987 symposium on security & privacy
- Macewen G H, et al. Multi-level security based on physical distribution. In: Proc. of the 1984 symposium on security & privacy
- Rushy J M, Randell B. A distributed secure system. In: Proc. of the 1983 symposium on security & privacy
- Anderson J P. A unification of computer and network security concepts. In: proc. of the 1985 symposium on security & privacy
- Chitturi A. Implementating Mandatory Network Security In a Policy-Flexible System; [Master Thesis]. Department of Computer Science, The University of Utah. June 1998
- Smailly S D. A network access control model for Flask; [Technical Report]. U. S. Department of Defense, July 1997
- Atkinson R. Security architecture for the Internet Protocol. RFC 1825, Internet Engineering Task Force, Aug. 1995
- Atkinson R. IP authentication header. RFC 1826, Internet Engineering Task Force, Aug. 1995
- Atkinson R. IP encapsulating security payload(ESP). RFC 1827, Internet Engineering Task Force, Aug. 1995
- Dierks T. The TLS Protocol Version 1.0. RFC 2246, Internet Engineering Task Force, Jan. 1999
- Robinson P. Understanding Digital Certifications and Secure Sockets Layer (SSL). Securing Digital Identities & Information Jan. 2001
- Papadopoulos C, Parulkar G M. Experimental evaluation of SUNOS IPC and TCP/IP protocol implementation. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1993, 1(2)
- Guo Chuancang, Zheng Shaoren. Analysis and Evaluation of the TCP/IP Protocol Stack of LINUX. In: Proc. 16th Ifip world computer congress Beijing, China 2000

(上接第62页)

- Hallapuro A, Karczewicz M, Malvar H. Low complexity transform and quantization. JVT of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG. Docs. JVT-B038 and JVT-B039, Jan. 2002
- Rao K R, Yip P. Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications. Boston: Academic Press, 1990
- Taubman D S, Marceline M W. JPEG2000 Image Compression. Boston: Kluwer, 2002
- Malvar H, Hallapuro A. Low-complexity Transform and quantization with 16-BIT arithmetic for H. 26L. www.vcodex.com
- Hallapuro A, Karczewicz M. Low complexity (I) DCT. ITU-T SG16 Doc. VCEG-N43, Sept. 2001
- Cham W. Development of integer cosine transforms by the princi-

- ple of dyadic symmetry. In: IEE Proc. Part 1, vol. 136. Aug. 1989. 276~282
- Richardson E G. Transform and quantization. H. 264 / MPEG-4 Part 10 White Paper 19/03/03 Page 1 of 9
- Malvar H S. Signal Processing with Lapped Transforms. Boston: Artech House, 1992
- Kerofsky L, Lei S. Reduced bit-depth quantization. ITU-T SG16 Doc. VCEG-N20, Sept. 2001
- Malvar H S. Low-Complexity length-4 transform and quantization with 16-Bit arithmetic. ITU-T SG16 Doc. VCEG-N44, Sept. 2001
- Bjontegaard G. Calculation of average PSNR differences between RD curves. ITU-T SG 16 Doc. VCEG-M33, Mar. 2001