

# 基于平衡多小波图像变换的视频多描述编码

柳薇 马争鸣

(中山大学电子与通信工程系信息处理实验室, 广州 510275)

**摘要** 提出了一种新的视频多描述编码方法,即基于平衡多小波图像变换的视频多描述编码。首先,把图像进行多小波变换,然后,按照图像多小波变换后子带图像分量的异同重组图像的多小波系数,相同分量的多小波系数就构成图像的一个描述。视频的每帧图像都如是处理,就得到视频的多描述编码。一个好的视频多描述编码方案应该满足两个基本条件:各个描述平均分担图像信息和各个描述能够互相差错掩埋。通过统计分析和数学推导发现,在目前几种常用的多小波中,只有平衡多小波能够满足视频多描述编码的两个条件。本文给出了各个描述之间进行差错掩埋的数学公式,并据此提出视频多描述编码的算法。实验结果表明,即使在丢失四分之三数据的情况下,该算法依然能够以接近30dB的PSNR值和较好的视觉效果恢复原图像。

**关键词** 图像多小波变换 视频多描述编码 网络传输

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)12-1466-07

## Multiple Description Video Coding Based on Balanced Multiwavelet Image Transform

LIU Wei, MA Zheng-ming

(Information Processing Laboratory Electronics Department, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

**Abstract** A new MD (multiple description) video coding method is proposed in this paper, which is based on balanced multiwavelet image transform. First, we apply balanced multiwavelet transform to the image, and then, corresponding components of each sub-band are gathered together, so that we decompose the image into 4 MDs. By treating every frame of the video sequences like this, we can get a theme of MD video coding. A practical MD coding theme must satisfy two requirements. Firstly, each description should carry the same amount of information. Secondly, there must be dependence among each description. We find among commonly used multiwavelets, only balanced multiwavelet can satisfy the two requirements. Furthermore, based on the feature of CARDBAL2 multiwavelet and strict mathematical deduction, we find a way to estimate the lost descriptions. The experimental results presented in this paper show that even 75% data of the image is lost, we can still get a recovered image at good quality and the PSNR value is nearly 30dB.

**Keywords** multiwavelet transform, multiple description coding, network transmission

## 1 引言

随着宽带网络的广泛应用,网络的视频实时传输已经成为视频编码研究的一个主流方向。网络的视频实时传输要克服数据包的丢失和有序达到两个难题。由于视频传输实时性的要求,在一定时限内没有到达的数据包将按丢包处理。因此,丢包是网络的

视频实时传输必须解决的根本问题<sup>[1]</sup>。

视频编码中的差错掩埋技术可以在一定程度上解决丢包的问题。所谓差错掩埋就是利用收到的数据通过内插或外推的方式恢复(掩埋)丢失的数据。差错掩埋技术已为最新的视频编码国际标准 MPEG-4<sup>[2]</sup>、H. 264<sup>[3]</sup>所采纳和推荐。视频的多描述编码就是一种差错掩埋技术。

所谓视频的多描述编码就是将视频分解成多个

部分,每个部分称为视频的一个描述。视频的多描述编码必须具备以下两个特点:

(1) 视频的各个描述必须平均分担图像信息,独立编码,在网络传输时各抢其道,公平竞争网络资源。

(2) 视频的各个描述之间必须具有足够的相关性,以便接收端可以根据接收到的描述对在传输过程中丢失的描述进行差错掩埋,从而恢复一定质量的视频。接收到描述数目越多,恢复视频的质量就越好。

多小波是一种新的小波,图像经过多小波变换后不但分解成 LL、HL、LH 和 HH 4 个子带图像,而且每个子带图像还进一步分解为 4 个分量。对平衡多小波来说,这 4 个分量恰好平分了图像的能量,而且相互之间具有很强的相关性。如果按照分量的异同来划分图像的多小波变换系数,则相同分量的多小波系数恰好构成图像的一个描述。视频的每帧都做如是处理,就得到视频的一种多描述编码。更进一步,利用平衡多小波图像变换本身的性质,可以推导出各个描述之间进行差错掩埋的数学公式。实验结果表明,根据这些公式进行差错掩埋,即使丢失四分之三数据,依然能够以接近 30dB 的 PSNR 值和较好的视觉效果恢复原图像。

## 2 多小波图像变换

设  $A$  是一个  $512 \times 512$  的矩阵,代表一幅数字图像,对  $A$  进行多小波变换的步骤如下:

(1) 前置滤波

$$A \Rightarrow \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

这里,  $A_{ij}$  都是  $256 \times 256$  的矩阵,  $i, j = 1, 2$ 。不同的多小波图像变换,其前置滤波的方式也不一样<sup>[4]</sup>。

(2) 行变换

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A_{Ll}^{(1)} & A_{Ll}^{(2)} & A_{Hl}^{(1)} & A_{Hl}^{(2)} \\ A_{Lb}^{(1)} & A_{Lb}^{(2)} & A_{Hb}^{(1)} & A_{Hb}^{(2)} \end{bmatrix}$$

这里,  $A_{Ll}^{(i)}, A_{Lb}^{(i)}, A_{Hl}^{(i)}$  和  $A_{Hb}^{(i)}$  都是  $256 \times 128$  的矩阵,  $i = 1, 2$ ,按下式计算:

$$\begin{bmatrix} A_{Ll}^{(1)}(k, m) \\ A_{Ll}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{11}(k, n) \\ A_{12}(k, n) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{Hl}^{(1)}(k, m) \\ A_{Hl}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{11}(k, n) \\ A_{12}(k, n) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{Lb}^{(1)}(k, m) \\ A_{Lb}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{21}(k, n) \\ A_{22}(k, n) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{Hb}^{(1)}(k, m) \\ A_{Hb}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{21}(k, n) \\ A_{22}(k, n) \end{bmatrix}$$

这里,  $k = 1, \dots, 256, m = 1, \dots, 128, L(n)$  和  $H(n)$  分别是多小波变换的低通滤波矩阵和高通滤波矩阵。多小波变换的边界问题按周期性边界处理。

(3) 列变换

$$\begin{bmatrix} A_{Ll}^{(1)} & A_{Ll}^{(2)} & A_{Hl}^{(1)} & A_{Hl}^{(2)} \\ A_{Lb}^{(1)} & A_{Lb}^{(2)} & A_{Hb}^{(1)} & A_{Hb}^{(2)} \end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix} A_{LL}^{(1,1)} & A_{LL}^{(2,1)} & A_{HL}^{(1,1)} & A_{HL}^{(2,1)} \\ A_{LL}^{(1,2)} & A_{LL}^{(2,2)} & A_{HL}^{(1,2)} & A_{HL}^{(2,2)} \\ A_{LH}^{(1,1)} & A_{LH}^{(2,1)} & A_{HH}^{(1,1)} & A_{HH}^{(2,1)} \\ A_{LH}^{(1,2)} & A_{LH}^{(2,2)} & A_{HH}^{(1,2)} & A_{HH}^{(2,2)} \end{bmatrix}$$

这里,  $A_{LL}^{(i,j)}, A_{LH}^{(i,j)}, A_{HL}^{(i,j)}$  和  $A_{HH}^{(i,j)}$  都是  $128 \times 128$  的矩阵,  $i, j = 1, 2$ ,按下式计算:

$$\begin{bmatrix} A_{LL}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{LL}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(n, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{LH}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{LH}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(n, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{HL}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{HL}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(n, k) \\ A_{Hb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{HH}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{HH}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(n, k) \\ A_{Hb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix}$$

这里,  $p = 1, 2; k, m = 1, \dots, 256$ 。

显然,图像经过多小波变换后,不但分解为 4 个子带图像:

$$A_{LL} = \begin{bmatrix} A_{LL}^{(1,1)} & A_{LL}^{(2,1)} \\ A_{LL}^{(1,2)} & A_{LL}^{(2,2)} \end{bmatrix} \quad A_{HL} = \begin{bmatrix} A_{HL}^{(1,1)} & A_{HL}^{(2,1)} \\ A_{HL}^{(1,2)} & A_{HL}^{(2,2)} \end{bmatrix}$$

$$A_{LH} = \begin{bmatrix} A_{LH}^{(1,1)} & A_{LH}^{(2,1)} \\ A_{LH}^{(1,2)} & A_{LH}^{(2,2)} \end{bmatrix} \quad A_{HH} = \begin{bmatrix} A_{HH}^{(1,1)} & A_{HH}^{(2,1)} \\ A_{HH}^{(1,2)} & A_{HH}^{(2,2)} \end{bmatrix}$$

而且每个子带图像还进一步分解为 4 个分量。这是图像多小波变换有别于图像单小波变换的地方。

## 3 基于多小波图像变换的视频多描述编码

如前所述,图像  $A$  经过多小波图像变换后分解为

$$A \Rightarrow \begin{bmatrix} A_{LL}^{(1,1)} & A_{LL}^{(2,1)} & A_{HL}^{(1,1)} & A_{HL}^{(2,1)} \\ A_{LL}^{(1,2)} & A_{LL}^{(2,2)} & A_{HL}^{(1,2)} & A_{HL}^{(2,2)} \\ A_{LH}^{(1,1)} & A_{LH}^{(2,1)} & A_{HH}^{(1,1)} & A_{HH}^{(2,1)} \\ A_{LH}^{(1,2)} & A_{LH}^{(2,2)} & A_{HH}^{(1,2)} & A_{HH}^{(2,2)} \end{bmatrix}$$

如果按分量的异同重新组织图像的多小波变换系数,就得到了一种图像多描述编码的方案:

$$A_{MD1} = \begin{bmatrix} A_{LL}^{(1,1)} & A_{HL}^{(1,1)} \\ A_{LH}^{(1,1)} & A_{HH}^{(1,1)} \end{bmatrix} \quad A_{MD2} = \begin{bmatrix} A_{LL}^{(1,2)} & A_{HL}^{(1,2)} \\ A_{LH}^{(1,2)} & A_{HH}^{(1,2)} \end{bmatrix}$$

$$A_{MD3} = \begin{bmatrix} A_{LL}^{(2,1)} & A_{HL}^{(2,1)} \\ A_{LH}^{(2,1)} & A_{HH}^{(2,1)} \end{bmatrix} \quad A_{MD4} = \begin{bmatrix} A_{LL}^{(2,2)} & A_{HL}^{(2,2)} \\ A_{LH}^{(2,2)} & A_{HH}^{(2,2)} \end{bmatrix}$$

如果把视频的每一帧都做如是处理,就得到了一种视频多描述编码的方案。但是,这仅仅是一个方案,这个方案能否实现,还要看它能否满足视频多描述编码的两个基本条件:各个描述是否平均分担了图像信息和各个描述能否互相进行差错掩埋。通过对常用的GHM多小波<sup>[5]</sup>、CL多小波<sup>[6]</sup>和平衡多小波(CARDBAL)<sup>[7,8]</sup>图像变换的统计分析<sup>[9]</sup>发现,只有基于平衡多小波图像变换的多描述编码方案能够做到平均分担图像信息。

### 4 基于平衡多小波(CARDBAL2)图像变换的视频多描述编码

#### 4.1 前置滤波

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,512} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{512,1} & \cdots & a_{512,512} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

对于平衡多小波图像变换来说,前置滤波就是亚抽样,也即

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,3} & \cdots & a_{1,511} \\ a_{3,1} & a_{3,3} & \cdots & a_{3,511} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{511,1} & a_{511,3} & \cdots & a_{511,511} \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} a_{1,2} & a_{1,4} & \cdots & a_{1,512} \\ a_{3,2} & a_{3,4} & \cdots & a_{3,512} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{511,2} & a_{511,4} & \cdots & a_{511,512} \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} a_{2,1} & a_{2,3} & \cdots & a_{2,511} \\ a_{4,1} & a_{4,3} & \cdots & a_{4,511} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{512,1} & a_{512,3} & \cdots & a_{512,511} \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} a_{2,2} & a_{2,4} & \cdots & a_{2,512} \\ a_{4,2} & a_{4,4} & \cdots & a_{4,512} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{512,2} & a_{512,4} & \cdots & a_{512,512} \end{bmatrix}$$

显然,  $A_{22}$  由  $A$  的偶数行和偶数列的元素组成。如果

知道  $A_{22}$ , 通过插值和外推, 可以近似得到  $A$  其他行列的元素。

#### 4.2 行变换

把平衡多小波的滤波矩阵  $L(n)$  和  $H(n)$  分别代入多小波图像变换中行变换的公式, 有

$$\begin{bmatrix} A_{Ll}^{(1)}(k, m) \\ A_{Ll}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{11}(k, n) \\ A_{12}(k, n) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m) + \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+1) +$$

$$\begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+2) +$$

$$\begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+3) +$$

$$\begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+4) +$$

$$\begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+5) +$$

$$0.707 \begin{bmatrix} A_{12}(k, 2m+1) \\ A_{12}(k, 2m+2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{Hl}^{(1)}(k, m) \\ A_{Hl}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{11}(k, n) \\ A_{12}(k, n) \end{bmatrix} =$$

$$-\begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m) - \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+1) -$$

$$\begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+2) -$$

$$\begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+3) -$$

$$\begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+4) -$$

$$\begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{11}(k, 2m+5) +$$

$$0.707 \begin{bmatrix} A_{12}(k, 2m+1) \\ A_{12}(k, 2m+2) \end{bmatrix}$$

把上面两式相加, 发现:

$$\begin{bmatrix} A_{Ll}^{(1)}(k, m) \\ A_{Ll}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{Hl}^{(1)}(k, m) \\ A_{Hl}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix}$$

$$= 1.414 \begin{bmatrix} A_{12}(k, 2m+1) \\ A_{12}(k, 2m+2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} A_{Lb}^{(1)}(k, m) \\ A_{Lb}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{21}(k, n) \\ A_{22}(k, n) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m) + \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+1) +$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+2) + \\
 & \begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+3) + \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+4) + \\
 & \begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+5) + \\
 & 0.707 \begin{bmatrix} A_{22}(k, 2m+1) \\ A_{22}(k, 2m+2) \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} A_{Hb}^{(1)}(k, m) \\ A_{Hb}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{21}(k, n) \\ A_{22}(k, n) \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m) - \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+1) - \\
 & \begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+2) - \\
 & \begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+3) - \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+4) - \\
 & \begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{21}(k, 2m+5) + \\
 & 0.707 \begin{bmatrix} A_{22}(k, 2m+1) \\ A_{22}(k, 2m+2) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

同样地, 把上面两式相加, 发现:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} A_{Lb}^{(1)}(k, m) \\ A_{Lb}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{Hb}^{(1)}(k, m) \\ A_{Hb}^{(2)}(k, m) \end{bmatrix} \\
 & = 1.414 \begin{bmatrix} A_{22}(k, 2m+1) \\ A_{22}(k, 2m+2) \end{bmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

### 4.3 列变换

进一步, 把平衡多小波的滤波矩阵  $L(n)$  和  $H(n)$  分别代入多小波图像变换中列变换的公式, 有

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} A_{LL}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{LL}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(n, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m, k) + \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+1, k) + \\
 & \begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+2, k) + \\
 & \begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+3, k) + \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+4, k) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+5, k) + \\
 & 0.707 \begin{bmatrix} A_{Lb}^{(p)}(2m+1, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(2m+2, k) \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} A_{LH}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{LH}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(n, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m, k) - \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+1, k) - \\
 & \begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+2, k) - \\
 & \begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+3, k) - \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+4, k) - \\
 & \begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Ll}^{(p)}(2m+5, k) + \\
 & 0.707 \begin{bmatrix} A_{Lb}^{(p)}(2m+1, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(2m+2, k) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

把上面两式相加, 发现:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} A_{LL}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{LL}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{LH}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{LH}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} \\
 & = 1.414 \begin{bmatrix} A_{Lb}^{(p)}(2m+1, k) \\ A_{Lb}^{(p)}(2m+2, k) \end{bmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} A_{HL}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{HL}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(n, k) \\ A_{Hb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m, k) + \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m+1, k) + \\
 & \begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m+2, k) + \\
 & \begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m+3, k) + \\
 & \begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m+4, k) + \\
 & \begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m+5, k) + \\
 & 0.707 \begin{bmatrix} A_{Hb}^{(p)}(2m+1, k) \\ A_{Hb}^{(p)}(2m+2, k) \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} A_{HH}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{HH}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n-2m) \begin{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(n, k) \\ A_{Hb}^{(p)}(n, k) \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} 0.022 \\ 0.003 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m, k) - \begin{bmatrix} 0.174 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{Hl}^{(p)}(2m+1, k) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 0.663 \\ 0.171 \end{bmatrix} A_{\text{HL}}^{(p)}(2m+2, k) - \\ & \begin{bmatrix} -0.171 \\ 0.663 \end{bmatrix} A_{\text{HL}}^{(p)}(2m+3, k) - \\ & \begin{bmatrix} 0.022 \\ -0.174 \end{bmatrix} A_{\text{HL}}^{(p)}(2m+4, k) - \\ & \begin{bmatrix} -0.003 \\ 0.022 \end{bmatrix} A_{\text{HL}}^{(p)}(2m+5, k) + \\ & 0.707 \begin{bmatrix} A_{\text{HB}}^{(p)}(2m+1, k) \\ A_{\text{HB}}^{(p)}(2m+2, k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

同样,把上面两式相加,发现:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} A_{\text{HL}}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{\text{HL}}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{\text{HH}}^{(p,1)}(m, k) \\ A_{\text{HH}}^{(p,2)}(m, k) \end{bmatrix} \\ & = 1.414 \begin{bmatrix} A_{\text{HB}}^{(p)}(2m+1, k) \\ A_{\text{HB}}^{(p)}(2m+2, k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

#### 4.4 描述之间的差错掩埋

在前面推导的式(1)~式(4)的基础上,通过进一步的推导,可以得到下面的描述:

##### 描述 1

$$\begin{aligned} & [A_{\text{LL}}^{(1,1)}(m, k) + A_{\text{LH}}^{(1,1)}(m, k)] + \\ & [A_{\text{HL}}^{(1,1)}(m, k) + A_{\text{HH}}^{(1,1)}(m, k)] = \\ & 1.414 [A_{\text{Lb}}^{(1)}(2m+1, k) + A_{\text{Hb}}^{(1)}(2m+1, k)] = \\ & 1.414 \times 1.414 A_{22}(2m+1, 2k+1) = \\ & 2 \times A_{22}(2m+1, 2k+1) \end{aligned}$$

这个公式说明,如果得到描述 1,就可以直接得到  $A_{22}$  奇数行和奇数列的元素,再通过插值和外推,还可以近似地得到  $A_{22}$  其他行列的元素。注意:边界问题按周期性边界处理。

##### 描述 2

$$\begin{aligned} & [A_{\text{LL}}^{(1,2)}(m, k) + A_{\text{LH}}^{(1,2)}(m, k)] + \\ & [A_{\text{HL}}^{(1,2)}(m, k) + A_{\text{HH}}^{(1,2)}(m, k)] = \\ & 1.414 [A_{\text{Lb}}^{(1)}(2m+2, k) + A_{\text{Hb}}^{(1)}(2m+2, k)] = \\ & 1.414 \times 1.414 A_{22}(2m+2, 2k+1) = \\ & 2 \times A_{22}(2m+2, 2k+1) \end{aligned}$$

这个公式说明,如果得到描述 2,就可以直接得到  $A_{22}$  偶数行和奇数列的元素,再通过插值和外推,还可以近似地得到  $A_{22}$  其他行列的元素。

##### 描述 3

$$\begin{aligned} & [A_{\text{LL}}^{(2,1)}(m, k) + A_{\text{LH}}^{(2,1)}(m, k)] + \\ & [A_{\text{HL}}^{(2,1)}(m, k) + A_{\text{HH}}^{(2,1)}(m, k)] = \\ & 1.414 [A_{\text{Lb}}^{(2)}(2m+1, k) + A_{\text{Hb}}^{(2)}(2m+1, k)] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 1.414 \times 1.414 A_{22}(2m+1, 2k+2) = \\ & 2 \times A_{22}(2m+1, 2k+2) \end{aligned}$$

这个公式说明,如果得到描述 3,就可以直接得到  $A_{22}$  的奇数行和偶数列的元素,再通过插值和外推,还可以近似地得到  $A_{22}$  其他行列的元素。

##### 描述 4

$$\begin{aligned} & [A_{\text{LL}}^{(2,2)}(m, k) + A_{\text{LH}}^{(2,2)}(m, k)] + \\ & [A_{\text{HL}}^{(2,2)}(m, k) + A_{\text{HH}}^{(2,2)}(m, k)] = \\ & 1.414 [A_{\text{Lb}}^{(2)}(2m+2, k) + A_{\text{Hb}}^{(2)}(2m+2, k)] = \\ & 1.414 \times 1.414 A_{22}(2m+2, 2k+2) = \\ & 2 \times A_{22}(2m+2, 2k+2) \end{aligned}$$

这个公式说明,如果得到描述 4,就可以直接得到  $A_{22}$  偶数行和偶数列的元素,再通过插值和外推,还可以近似地得到  $A_{22}$  其他行列的元素。

通过上面的数学推导,可以看到:

(1) 如果接收到一个描述,就可以直接(无失真地)恢复  $A_{22}$  的奇数行奇数列的元素(当接收到描述 1 时),或者  $A_{22}$  的偶数行奇数列的元素(当接收到描述 2 时),或者  $A_{22}$  的奇数行偶数列的元素(当接收到描述 3 时),或者  $A_{22}$  的偶数行偶数列的元素(当接收到描述 4 时),也就是  $A_{22}$  的四分之一的元素;

(2) 如果收到两个描述,例如当接收到描述 1 和描述 2 时,就可以直接恢复  $A_{22}$  的奇数行奇数列的元素和  $A_{22}$  的偶数行奇数列的元素,也就是说  $A_{22}$  的奇数列的元素,也即  $A_{22}$  四分之二(二分之一)的元素;

(3) 如果收到 3 个描述,例如当接收到描述 1、描述 2 和描述 3 时,就可以直接恢复  $A_{22}$  奇数行奇数列的元素、 $A_{22}$  偶数行奇数列的元素和  $A_{22}$  奇数行偶数列的元素,也就是  $A_{22}$  四分之三的元素。

$A_{22}$  的元素与  $A_{11}$ 、 $A_{12}$  和  $A_{21}$  的元素是相邻元素的关系,通过插值和外推,可以相当近似地恢复(掩埋)  $A_{11}$ 、 $A_{12}$  和  $A_{21}$  的元素。最后,通过多小波变换,就可以恢复(掩埋)丢失的描述。

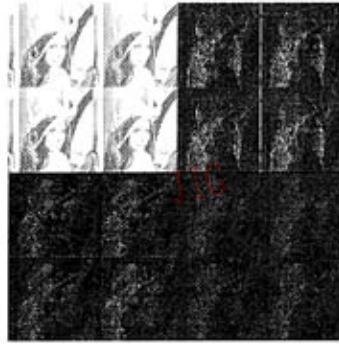
## 5 实验结果

图 1 表示基于平衡多小波图像变换的图像多描述编解码的结果。显然,可以把图 1(c)~(f) 的 4 个描述看成是某个小图像的单个小波变换;从图 1(i) 可以看到,即使丢失了四分之三的数据,该算法依然能够以较好的 PSNR 值和视觉效果恢复原图像。

图 2 是图像多描述的压缩编码效率曲线。图像



(a) 原图



(b) 平衡多小波图像变换结果



(c) 描述 1



(d) 描述 2



(e) 描述 3



(f) 描述 4



(g) 差错掩埋的结果

(丢失描述 1, PSNR=34.42)



(h) 差错掩埋的结果

(丢失描述 1,4, PSNR=33.04)



(i) 差错掩埋的结果

(丢失描述 1,3,4, PSNR=29.43)

图 1 基于平衡多小波图像变换的图像多描述编码的结果

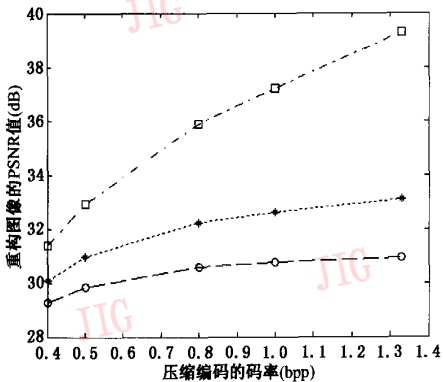


图 2 图像多描述的压缩编码效率曲线

拆分为多个描述后,每个描述单独进行压缩编码(采用小波图像压缩编码)。码率愈高,也即压缩比愈低,但 PSNR 值愈高。

### 6 结 论

与视频的分层编码一样,视频的多描述编码也具有网络拥塞时自适应调节的能力,但是它们自适应调节的方式迥然不同。在视频的分层编码中,发送端是自适应调节的主体。发送端把视频分解为基础层(重要层)和增强层(次要层),在网络拥塞时只发送基础层。在视频的多描述编码中,网络是自适应调节的

主体。网络决定那些描述被送达、那些描述被丢弃。

视频的多描述编码不等于压缩编码。视频拆分为多个描述后,每个描述还要单独进行压缩编码。在小波分析的理论中,正交、紧支和对称等性质具有重要的作用。正交有助于能量向相关矩阵的对角线汇聚(也就是说正交可以去相关,从而有利于压缩编码),紧支可以实现有限长度滤波,对称能够保持线性相位。在各种各样的小波中,能够把这三者集于一身的唯有多小波。我们利用图像多小波变换后不同子带图像的相同分量作为图像的描述,这样做有利于随后对描述进行小波图像压缩编码。

本文首次把多小波图像变换应用于图像的多描述编码;在常用的几种多小波中,通过统计分析,首次得出平衡多小波最为适合图像多描述编码的结论;根据平衡多小波图像变换的特点,通过严格的数学推导,首次得出图像多描述编码差错掩埋的公式。实验结果表明,根据这些公式进行差错掩埋,即使丢失四分之三的数据,依然能够以接近 30dB 的 PSNR 值和较好的视觉效果恢复原图像。

### 参考文献

- Goyal V K. Multiple description coding: compression meets the network[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 18(5):74~93.
- ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N4668-2002. Overview of the MPEG-4 Standard[S].
- ITU-T Q6/16. VCEG ITU-T H. 26L standardisation [S].
- 黄卓君,马争鸣. 多小波图像编码中前置滤波器的设计[J]. 电路与系统学报,2000,5(2):62~66.
- Heller P, Strang G, Topiwala P, et al. The application of multiwavelet filter banks to signal and image processing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999,8(4):548~563.
- Strela V, Walden A T. Signal and Image Denoising via Wavelet Thresholding: Orthogonal and Biorthogonal, Scalar and Multiple Wavelet Transforms [A]. In: Nonlinear and Nonstationary Signal Processing[M], Edited By Fitzgerald W. F, Smith R L, Walden A T, et al, Cambridge University Press, 2001:375~388.

- Selesnick I. Cardinal multiwavelets and the sampling theorem [A]. In: ICASSP' 99 Proceedings [C], Phoenix, Arizona, USA, 1999,3:1209~1212.
- Lebrun J, Vetterli M. Balanced multiwavelet[A]. In: ICASSP' 97 Proceedings[C], Munich, Germany, 1997,3:2473~2476.
- 黄卓君,马争鸣. 多小波图像变换的统计分析[J]. 中国图象图形学报(A版),2001,6(12):1198~1203.

### 附录:平衡多小波图像变换低通和高通滤波矩阵

平衡多小波图像变换的低通和高通滤波矩阵是有限长度的,其非零部分如下:

$$L(0) = \begin{bmatrix} 0.022 & 0.000 \\ 0.003 & 0.000 \end{bmatrix}, L(1) = \begin{bmatrix} 0.174 & 0.707 \\ 0.022 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$L(2) = \begin{bmatrix} 0.663 & 0.000 \\ 0.171 & 0.707 \end{bmatrix}, L(3) = \begin{bmatrix} -0.171 & 0.000 \\ 0.663 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$L(4) = \begin{bmatrix} 0.022 & 0.000 \\ -0.174 & 0.000 \end{bmatrix}, L(5) = \begin{bmatrix} -0.003 & 0.000 \\ 0.022 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$H(0) = \begin{bmatrix} -0.022 & 0.000 \\ -0.003 & 0.000 \end{bmatrix}, H(1) = \begin{bmatrix} -0.174 & 0.707 \\ -0.022 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$H(2) = \begin{bmatrix} -0.663 & 0.000 \\ -0.171 & 0.707 \end{bmatrix}, H(3) = \begin{bmatrix} 0.171 & 0.000 \\ -0.663 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$H(4) = \begin{bmatrix} -0.022 & 0.000 \\ 0.174 & 0.000 \end{bmatrix}, H(5) = \begin{bmatrix} 0.003 & 0.000 \\ -0.022 & 0.000 \end{bmatrix}$$



柳薇 1976年生。现为中山大学通信与信息系统专业博士研究生。研究方向为多媒体数据处理与传输。

E-mail: isde09@zsu.edu.cn



马争鸣 1957年生。教授。1989年毕业于清华大学获模式识别与智能控制专业博士学位。主要研究方向为多媒体数据处理与传输。