

# 基于小波系数块的运动补偿<sup>1)</sup>

钟敏生 马争鸣

(中山大学电子系信息处理实验室 广州 510275)

(E-mail: isde09@zsu.edu.cn)

**摘要** 提出基于小波系数块的运动补偿算法. 所谓小波系数块是指图像的部分小波系数, 它们只与图像的某个局部相关. 该文提出的算法先在时空域进行运动估计, 得到预测块的运动矢量. 然后利用小波系数的局部空频特性, 在小波变换域用参考块的小波系数块对预测块的小波系数块进行补偿. 在时空域进行运动估计, 可以充分利用视频编码多年来在运动估计方面的研究成果. 在小波变换域上进行运动补偿, 则避免了产生额外的频率成分. 文中的理论分析和实验结果都表明, 所提出的算法要优于常用的小波视频编码算法.

**关键词** 小波视频编码, 运动补偿, 小波系数块

**中图分类号** TP391

## Motion Compensation Based on Wavelet Coefficient Blocks

ZHONG Min-Sheng MA Zheng-Ming

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

(E-mail: isde09@zsu.edu.cn)

**Abstract** An algorithm of motion compensation based on wavelet coefficient blocks is presented in this paper. The so-called wavelet coefficient block (WCB) consists of those wavelet coefficients of an image that are only related to a local region of the image. The algorithm first makes motion estimation in spatial/temporal domain and obtains motion vectors for each prediction block. The algorithm then takes advantage of local spatial-frequency characteristic of wavelet coefficients and compensates the WCB of prediction block with that of reference block. Motion estimation in spatial/temporal domain can make full use of the results achieved in the research of video coding. Motion compensation in wavelet transform domain can avoid the appearance of extra frequency. The theoretical analysis and experimental results presented in this paper show that the algorithm is superior to the commonly-used video algorithm.

**Key words** Wavelet video coding, motion compensation, wavelet coefficient block

1) 广东省自然科学基金(021759)和中山大学重点建设高水平大学专项资金资助

Supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province(021759) and Special Foundation for Key High Level of Zhongshan University

收稿日期 2002-01-09 收修改稿日期 2003-03-24

Received January 9, 2002; in revised form March 24, 2001

# 1 引言

目前,小波视频编码的算法大致可分为三类.

1) 第一类算法是在时空域上进行运动估计和运动补偿,用于运动补偿的预测误差采用小波图像编码.由于预测误差是按块产生的,块与之间突兀的边界会引入大值小波系数,因此,这类算法要辅以各种改进的措施<sup>[1,2]</sup>.

2) 第二类算法是在小波变换域上进行运动估计和运动补偿.由于小波变换不是“移不变”的变换,因此,必须采取措施,把被小波变换扭曲了的运动再扭曲过来<sup>[3,4]</sup>.

3) 第三类算法是利用三维小波变换进行视频编码<sup>[5,5]</sup>.

本文提出一种新的小波视频编码算法,这种算法介于上述第一类算法和第二类算法之间,理论分析和实验结果都表明,本文提出的算法要优于第一类小波视频编码算法.

# 2 小波系数块的形成

图像的小波系数具有局部空频性质.因此,如果我们只是关心图像的某个局部,则可以只考虑与这个局部有关的那些小波系数.这些小波系数就构成了图像这个局部的所谓“小波系数块”.下面具体说明小波系数块形成的过程.

图像  $I$  经过小波变换后分解为四幅子图像:  $LL1, LH1, HL1$  和  $HH1$ , 如图 1 所示.一般来说,对于图像的一个像素  $I(n, m)$ , 与这个像素有关的小波系数是

$$LL1\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor\right), LH1\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor\right), HL1\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor\right), HH1\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor\right)$$

其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整数.

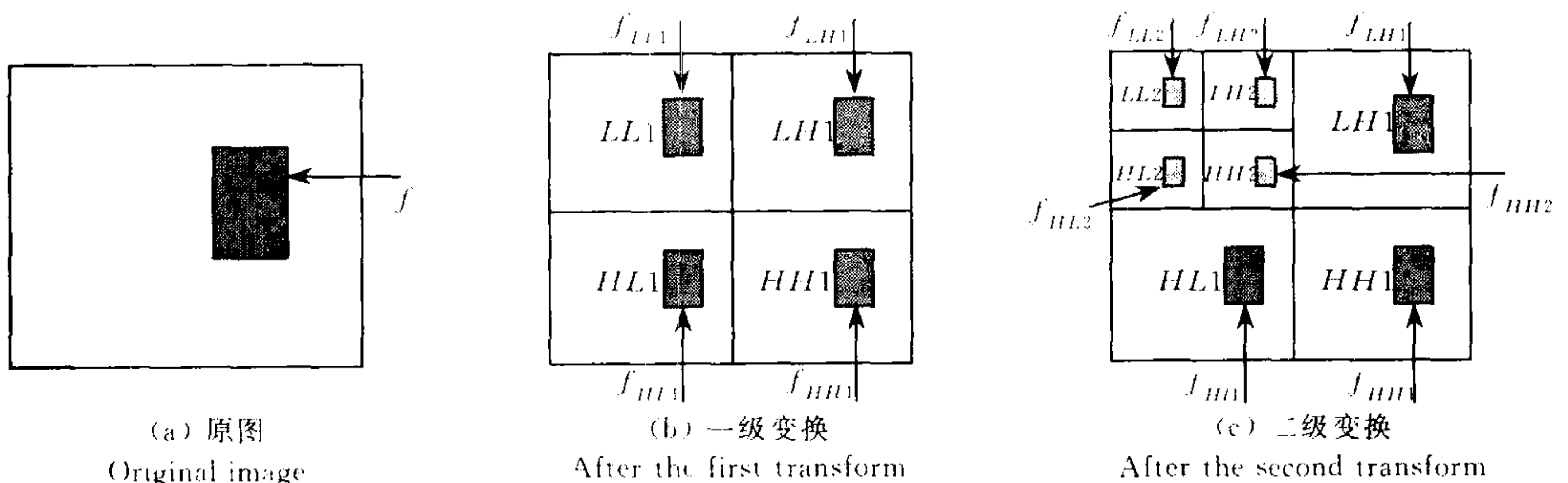


图 1 图像的小波变换  
Fig.1 Wavelet transform of image

通常,为了减小边界损耗,我们不是考虑图像的一个像素,而是考虑图像的一个区域,如图 1(a)中的  $f$  区域.根据上述像素与小波系数的对应关系,可以确定  $LL1, LH1, HL1$  和  $HH1$  子图像中与  $f$  区域相对应的小波系数,也即图 1(b)中所示的  $f_{LL1}, f_{LH1}, f_{HL1}$  和  $f_{HH1}$  区域的小波系数.这些区域的小波系数就构成了图像  $f$  区域的小波系数块.不难验证,通过小波反变换,可以由小波系数块重构图像  $f$  区域的内容.

在实际应用中,常常要对图像做多次小波变换,也即对每次变换后的  $LL$  子图像再做小波

变换. 例如, 对  $LL1$  子图像再做小波变换, 得到四幅更小的子图像:  $LL2, LH2, HL2$  和  $HH2$  (如图 1(c)所示). 同样, 如果我们只是考虑  $LL1$  子图像中的局部区域  $f_{LL1}$ , 根据像素与小波系数的对应关系, 可以确定  $LL2, LH2, HL2$  和  $HH2$  子图像中与  $f_{LL1}$  区域相对应的小波系数, 如图 1(c)中所示的  $f_{LL2}, f_{LH2}, f_{HL2}$  和  $f_{HH2}$  区域的小波系数. 这些区域的小波系数就构成了  $LL1$  子图像中  $f_{LL1}$  区域的小波系数块. 如果再加上  $LH1, HL1$  和  $HH1$  子图像中  $f_{LH1}, f_{HL1}$  和  $f_{HH1}$  区域的小波系数, 就得到原图像  $f$  区域小波系数块更为细致的结构: 这时小波系数块是由  $f_{LL2}, f_{LH2}, f_{HL2}, f_{HH2}, f_{LH1}, f_{HL1}$  和  $f_{HH1}$  区域的小波系数组成(如图 1(c)所示).

### 3 基于小波系数块的运动补偿

我们的算法属于块匹配视频编码算法. 这类算法总是假设预测帧中的许多区域(称为预测块)与参考帧中的相应区域(称为参考块)有相同的内容, 只是空间位置因时隙发生平移. 这个平移可以通过运动估计, 用运动矢量来表示. 在重建预测帧时, 可以通过各个预测块的运动矢量, 在参考帧中找到相应的参考块, 用这些参考块代替预测块. 其实, 既然预测块与参考块有相同的内容, 那么, 它们的小波系数块也应该有相同的内容, 我们也可以用参考块的小波系数块来代替预测块的小波系数块; 然后通过小波反变换重建预测帧, 这就是基于小波系数块的运动补偿的基本原理.

#### 3.1 编码算法

下面结合具体例子叙述基于小波系数块的运动补偿算法. 我们抽取 foreman 序列的第一帧为参考帧(图 2(a), I 帧), 第二帧为预测帧(图 2(b), P 帧).

1) 把 P 帧划分为  $16 \times 16$  的预测块, 然后对于每个预测块在 I 帧中寻找与之最佳匹配的参考块, 从而得到预测块的运动矢量.

2) 对 I 帧和 P 帧分别进行  $D9/7$  双正交小波变换, 得到它们的小波系数, 分别如图 2(c)和图 2(d)所示.

3) 对于 P 帧的每一个预测块, 根据图像像素与小波系数局部相关的性质, 从 P 帧的小波系数中取出与预测块相关的小波系数, 组成预测块的小波系数块. 把这些小波系数块按预测块的空间位置重新排列, 得到 P 帧小波系数块的分布图(如图 2(e)所示).

4) 对于 P 帧的每一个预测块, 根据它的运动矢量, 在 I 帧中确定它的参考块; 再根据图像像素与小波系数局部相关的性质, 从 I 帧的小波系数中取出与参考块相关的小波系数, 组成参考块的小波系数块. 把预测块的小波系数块减去参考块的小波系数块, 得到预测块小波系数的预测误差(如图 2(f)所示). 对 P 帧的每一个预测块都做如是处理, 就可以得到 P 帧小波系数的预测误差.

5) 把按块分布的 P 帧小波系数的预测误差, 还原为按子带图像分布的形式(如图 2(g)所示), 然后对其进行压缩编码(量化、零树编码和熵编码).

6) 对 I 帧小波系数进行压缩编码.

为了进行比较, 按照通常的算法(即本文引言所说的第一类算法), 对 P 帧的每一个预测块, 根据它的运动矢量, 在 I 帧中找到它的参考块; 把预测块减去参考块, 得到预测误差; 再对预测误差进行小波变换, 得到预测误差的小波系数(如图 2(h)所示). 我们对图 2(d)、图 2(g)和图 2(h)所包含的各个子图像的能量进行了统计, 得出的数据列在表 1 中. 从表 1 可以看到:

1)图 2(g)中各个子图像的能量都远远小于图 2(d)中各个子图像的能量,这表明按照本文算法得到的小波系数预测误差的值要远远小于 P 帧小波系数本身的价值;

2)图 2(h)中各个高频子图像的能量,不但远远大于图 2(g)中各个高频子图像的能量,甚至大于图 2(d)中各个高频子图像的能量,这表明按照常用算法产生的预测误差帧,其高频成份甚至超过了 P 帧本身的高频成份;这额外的高频成份来源于预测误差帧中块与块之间的差异,于是,在 LL1 子图像编码中辛苦节省下来的比特,又不得不花费在这些高频成分的编码上;

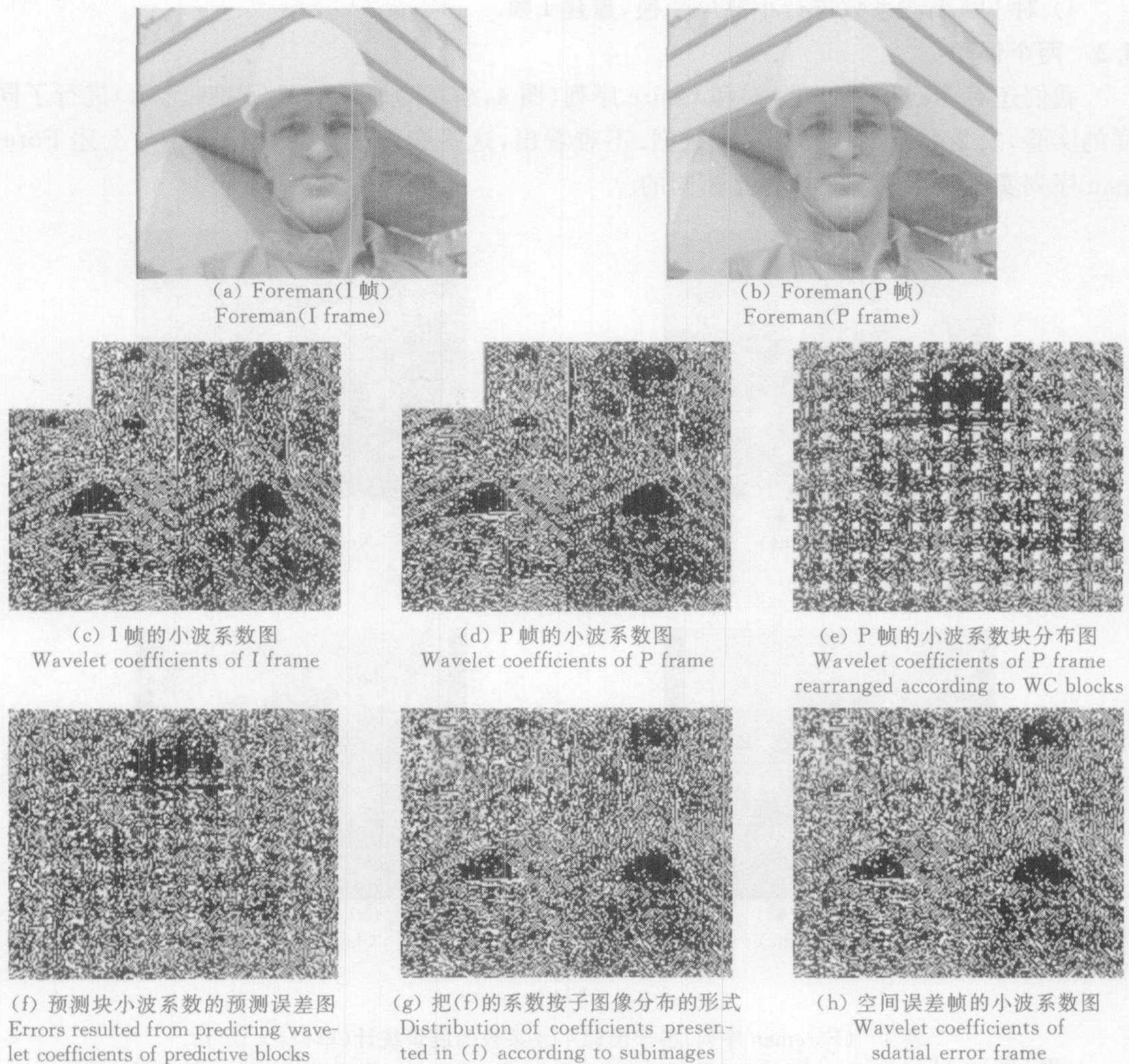


图 2 Foreman 序列的实验结果

Fig. 2 The experimental results of Foreman

3)图 2(g)中各个高频子带图像的能量较小,意味着编码时比特消耗也较少,节省下来的比特,可以用于提高压缩比,也可以用于减小量化步长,从而提高信噪比.

### 3.2 解码算法

1)对压缩码流进行熵解码、零树解码和反量化,得到运动矢量、I 帧小波系数和 P 帧小波系数的预测误差.

2) 变换域中的运动补偿,先把 P 帧小波系数的预测误差重组为按预测块的小波系数块分布的形式;然后对于每一个预测块,根据它的运动矢量,在 I 帧中确定参考块的位置,再根据图像像素与小波系数局部相关的性质,从 I 帧的小波系数中取出与参考块相关的小波系数,组成参考块的小波系数块;最后把预测块小波系数的预测误差与参考块的小波系数块相加,就得到预测块的小波系数块.对 P 帧的每一个预测块都做如是处理,就得到 P 帧的小波系数.

3) 把 P 帧的小波系数从按块分布的形式还原为按小波变换子图像分布的形式,然后进行小波反变换,重建 P 帧.

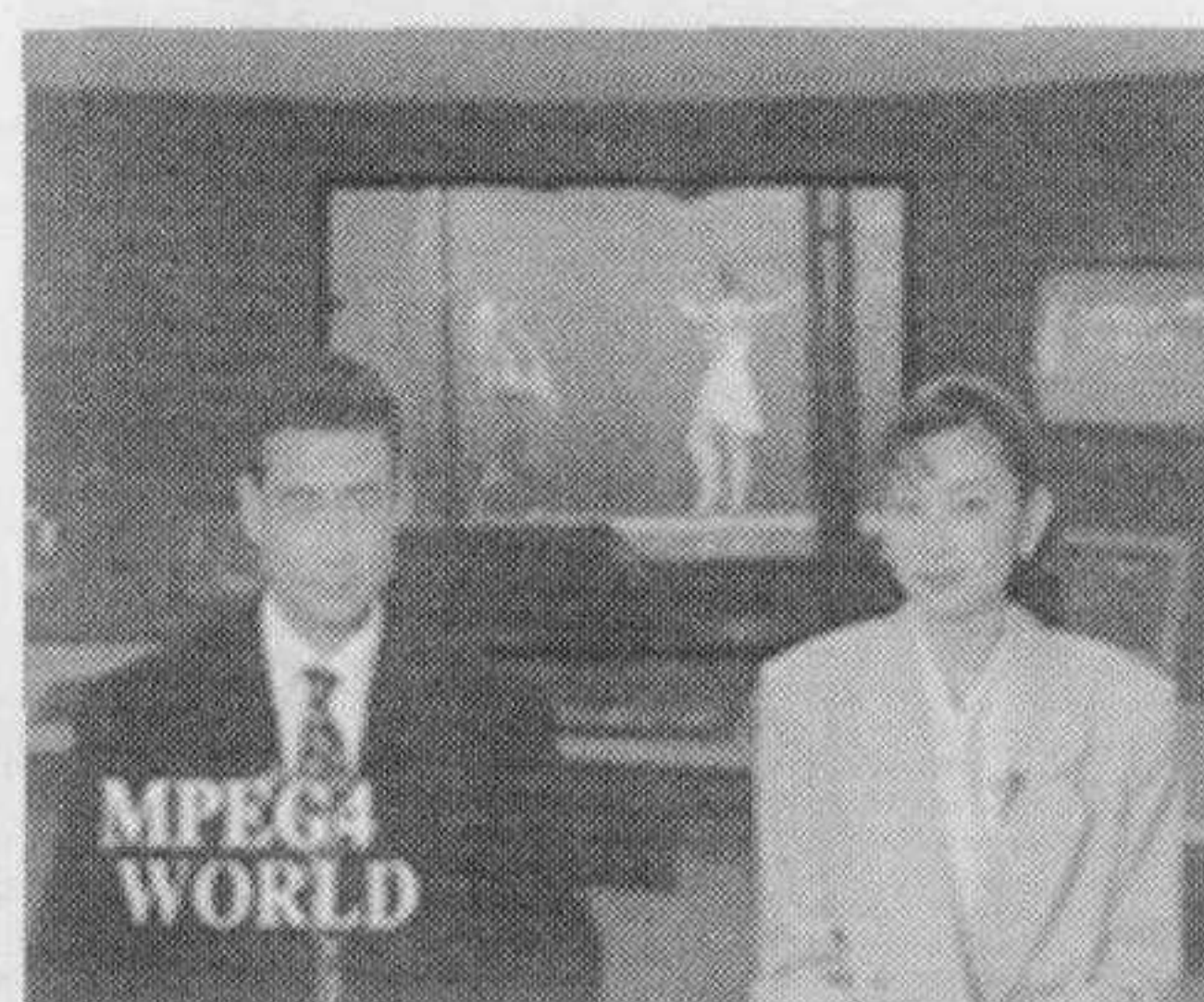
4) 对 I 帧小波系数进行小波反变换,重建 I 帧.

### 3.3 两个例子

我们还对 News 序列(图 3)和 Claire 序列(图 4,缩小为原图的四分之一显示)进行了同样的实验,表 2 列出了有关的实验数据.不难看出,这些实验数据的统计规律与上述 Foreman 序列实验数据的统计规律是相同的.



(a) News(I 帧)  
News(I frame)



(b) News(P 帧)  
News(P frame)

图 3 News 序列  
Fig. 3 News series



(a) Claire(I 帧)  
Claire(I frame)



(b) Claire(P 帧)  
Claire(P frame)

图 4 Claire 序列  
Fig. 4 Claire series

表 1 (Foreman 序列)各子图像小波系数的能量统计(单位:  $\times 10^6$ )

Table 1 (Foreman series)Statistics of wavelet coefficient energy of subimages(Unit:  $\times 10^6$ )

	LL1	LH1	HL1	HH1	LH2	HL2	HH2
图 2(d)	688	1.30	1.15	0.497	0.273	0.559	0.132
图 2(g)	2.98	0.433	0.39	0.259	0.157	0.281	0.0789
图 2(h)	2.56	1.05	0.791	0.620	0.517	0.707	0.222

表 2 (News 序列)各子图像小波系数的能量统计(单位:  $\times 10^6$ )

Table 2 (News series)Statistics of wavelet coefficient energy of subimages(Unit:  $\times 10^6$ )

	LL1	LH1	HL1	HH1	LH2	HL2	HH2
P 帧小波系数	206	3.68	2.02	0.713	2.16	0.853	0.15
本文算法产生的二帧小波系数之差	0.123	0.146	0.117	0.017	0.047	0.078	0.006
P 帧的预测误差帧的小波系数	0.122	0.243	0.148	0.040	0.085	0.111	0.013

## 4 结束语

从运动的本质来说,运动估计最宜在时空域进行;从编码效率来说,运动补偿最宜在变换进行。但是,运动估计与运动补偿相生相存,很难分离。本文利用图像小波变换系数的局部空频特性,实现了在时空域进行运动估计、在变换域进行运动补偿。另外,在算法复杂度和编码时间方面,本文算法与常用的算法(即引言中所说的第一类算法)大致相当。在编码过程中,两种算法都要进行两次小波变换,都要在时空域进行运动估计。本文算法唯一增加的工序只是把图像的小波系数从按子带图像分布的形式重新组合为按小波系数块分布的形式。这道工序所花费的计算量和时间是很小的。

### References

- 1 Katto J, Ohki J I, Nogaki S, Ohta M. A wavelet codec with overlapped motion compensation for very low bitrate environment. *IEEE Transactions on Circuits System and Video Technology*, 1994, **4**:328~338
- 2 Orchard M T, Sullivan G J. Overlapped block motion compensation: An estimation-theoretic approach. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, **3**:693~699
- 3 Tsunashima K, Stampleman J B, Bove Jr V M. A scalable motion-compensated subband image coder. *IEEE Transactions on Communication*, 1994, **42**:1894~1901
- 4 Park Hyun-Wook, Kin Hyung-Sun. Motion estimation using low-band-shift method for wavelet-based moving-picture coding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, **9**(4): 577~587
- 5 Podilchuk C I, Jayant N S, Farvardin N. Three-dimensional subband coding of video. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**:125~139
- 6 Shen Lan-Sun. Image Coding and Asynchronous Transmission. Beijing: People's Postal Publishing House, 1998(in Chinese)1998

**钟敏生** 硕士研究生. 研究方向为多媒体数据处理与传输.

(ZHONG Min-Sheng Master student. Her research interests include multimedia data processing and transmission.)

**马争鸣** 博士,现为中山大学电子与通信工程系教授. 研究方向为多媒体数据处理与传输.

(MA Zheng-Ming Professor in the department of Electronic and Communication Engineering at Zhongshan University, received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 1989. His research interests include multimedia data processing and transmission.)