

## 用于快速块匹配运动估计的自适应十字模式搜索

王晓燕 郑建宏

(重庆邮电学院 重庆 400065)

**摘要:** 该文提出了一种新的快速块匹配运动估计算法, 即自适应十字模式搜索。它综合了固定模式搜索和空间相关搜索两方面的优点, 与目前很流行的菱形搜索 (DS) 相比具有较好的性能。

**关键字:** 块匹配, 运动估计, 自适应十字模式, 菱形搜索

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)01-0104-04

## Adaptive Rood Pattern Search for Fast Block-Matching Motion Estimation

Wang Xiao-yan Zheng Jian-hong

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** This paper proposes an adaptive rood pattern search, a new fast block-matching motion estimation algorithm. It combines the advantages of fixed search pattern and spatial correlation search pattern. Compared to the popular diamond search pattern, it has better performances.

**Key words** Block-matching, Motion estimation, Adaptive rood pattern, Diamond search

### 1 引言

在视频编码中, 由于连续视频帧中存在着很大的时间冗余, 补偿技术被广泛地应用来移走时间冗余。而运动估计在运动补偿中起了很大的作用。

运动估计方法分为两类: 块匹配算法 (BMA) 和像素递归算法 (PRA)。因为 BMA 简单, 所以被广泛应用。在 BMA 中, 当前图像帧被分成大小固定的矩形块。对于每一块, 通过在前一帧的搜索窗内找到最匹配的块来估计当前运动向量。找到最匹配的块是通过最小化一个匹配判别式来执行, 诸如均方差 (MSE) 或绝对差和 (SAD), 搜索点在参考帧中以当前块的位置为中心的搜索窗内移动。当前块相对于匹配块在水平和垂直方向上的位移组成当前块的运动向量。快速匹配算法都是建立在一个假设上的, 这个假设就是运动补偿剩余误差平面是一个运动向量位移的凸函数, 但是这个假设很少时候是真的。所以通过这些快速算法得到的最匹配的块通常是一个局部最优。也就是说, 大多数快速算法是以运动估计的准确度为代价来减少计算量的。

理想的运动向量可以通过全搜索算法 (FSA) 获得。假设在水平和垂直方向的最大运动是  $\pm W$ , 那么如果使用 FSA, 需要检测  $(2W+1)^2$  个运动向量。编码器的复杂度中, 运动估计占主要, 尤其是当  $W$  很大时, 占据编码器计算量的 80%。为了减少 FSA 的计算需要, 很多快速搜索算法被提出, 诸如

2-D 对数搜索 (LOGS)<sup>[1]</sup>、三步搜索 (TSS)<sup>[2]</sup>、新三步搜索 (NTSS)<sup>[3]</sup>、四步搜索 (FSS)<sup>[4]</sup>、非限制偏向中心菱形搜索 (UCBDS)<sup>[5]</sup> 等。其基本思想都是测试当前步骤的一些点, 然后限制下一步的搜索点在当前出现最小块匹配判别 (BDM) 的点附近。

### 2 快速块匹配算法分析

用于运动估计的 BMA 由于它的有效性和简单性在目前的很多视频编码标准中广泛地被使用, 例如 H.261, H.263, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4 以及 H.264。BMA 中最好的是全搜索算法, 因为它在搜索窗中竭尽所能地搜索最优匹配的块。但是全搜索的计算量很大, 在实时视频编码应用中不合适。快速 BMA 则是解决这个问题的关键。现存的快速 BMA 可以分为 4 类。

#### 2.1 固定搜索模式的快速块匹配算法

这种方法是基于下面的假设: 运动估计匹配错误随着搜索方向朝整体最小 BDM 位置移动而单调减少, 并且错误曲面是单峰的。每个块的运动矢量 (MV) 使用一套固定搜索模式来独立搜索。诸如 2-D LOGS, TSS, FSS, 基于块的梯度下降搜索 (BBGDS)<sup>[6]</sup> 和最近的菱形搜索 (DS)<sup>[7]</sup> 都属于这一类。简单和规则化是这一类算法的最重要的优点。然而在跟踪大的运动上具有较差的适用性和搜索效率。

其中, DS 算法被 MPEG-4 的校正模型所接受。DS 利用

了在实际视频序列中存在的偏于中心的 MV 分布特征, 并且发展了两种基于菱形的搜索模式, 即大菱形搜索模式 (LDSP) 和小菱形搜索模式 (SDSP)。与其他的 BMA 相比, DS 在搜索准确度、效率和计算复杂度上都有好的表现。

然而, 当固定搜索模式的大小和实际运动的幅度不匹配时, 过搜索或者搜索不足都可能发生, 并且将引起一定的搜索缺陷和不准确。例如, 在 DS 中, LDSP 对于搜索距离中心小于两个像素的小的 MV 将显得太大, 会导致过搜索。另一方面, 对于一些大的和复杂的运动的情况, LDSP 又显得太小了, 也就是搜索不足。

## 2.2 基于块内相关的快速块匹配算法

这一类方法利用当前块与在空间或者时间上相邻的块之间的相关性来预测目标 MV。目标 MV 可以通过计算相邻 MV 的统计平均或者根据一定的判别方式选择其中一个相邻的 MV 来预测。在预测以后, 搜索窗的大小和搜索中心相应地被重新定义, 然后在这个新的搜索窗中执行 FS 或者一些快速 BMA。

在这种方法中, 需要额外的存储器来存储相邻 MV。

## 2.3 使用等级或者多分辨率搜索框架的快速块匹配算法

这类方法利用了同一图像的不同层次的代表形式之间的相关性。在等级方法中, 不同等级中的图像大小是相同的, 但是块大小不同。

多分辨率方法利用不同的图像分辨率。就估计准确度而言, 这种方法具有相对好的效果, 然而由于仍然使用全搜索 (FS), 所以计算复杂度仍然很大。

## 2.4 在匹配错误判别计算上使用下采样像素的快速块匹配算法

前 3 种方法努力的目标都是通过限制搜索点的数目来减少运动估计 (ME) 的计算。而这类方法是减少在匹配错误判别计算中使用的像素数目来加速 ME。

将要提出的算法思想混合了基于固定模式的方法和基于空间相关的方法, 注重于算法的简单化和自由化。

## 3 自适应十字模式算法 (ARPS)

这里介绍一种简单快速的块匹配算法, 叫做自适应十字模式搜索 (Adaptive Rood Pattern Search, ARPS)。它包括两个步骤: (1) 初步搜索; (2) 精确局部搜索。对于每一个宏块, 初步搜索仅执行一次为以后的精确搜索找到一个好的起始点。通过这个步骤, 不必要的中间搜索和陷入局部最小点的情况将减少。初始搜索步骤中, 自适应十字模式 (ARP) 被使用, ARP 的大小由每个宏块自动的决定。在精确局部搜索阶段, 一个固定大小的十字模式被重复地执行, 直到找到最后的 MV。为了进一步加速搜索过程, 可以使用零运动提前判别 (ZMP), 尤其对于具有小运动的序列效果很好, 从后面的与 DS 相比的结果中可以看出。

### 3.1 ARPS 介绍

如上面提到的, 对于小的运动, 小的搜索模式比大的搜索模式要适合; 相反, 大的搜索模式在检测大的运动上有优势。总之, 基于模式的搜索算法的速度和准确度最终取决于搜索模式的尺寸和目标 MV 的幅度。所以, 根据当前块的被估计的运动行为来使用不同的搜索模式将是我们想要的。有两个问题需要解决: (1) 如何预先决定当前块的运动行为; (2) 什么是最合适的搜索模式的尺寸和形状。

首先考虑第一个问题, 在大多数情况下, 属于同一个运动对象的相邻宏块 (MB) 有相似的运动。所以当前块的运动行为可以使用在空间或者时间域上相邻块的 MV 来预测。至于第二个问题, 我们使用两种搜索模型: 一个是 ARP, 对于每个 MB, 可以根据估计运动的行为动态地调整其尺寸。ARP 仅仅在开始时执行一次, 然后使用另一种模式, 即固定大小的搜索模式来完成剩余的局部搜索。

### 3.2 目标 MV 的预测

为了获取当前块的准确的 MV 预测, 有两个因素需要考虑: (1) 包含相邻块的支持区域的选择, 即将选择哪些 MV 用来估计预测 MV; (2) 计算预测 MV 的算法。

在时域, 参考帧中相同位置的块是最好的选择, 而且, 参考帧中相邻块也将提供很好的预测候选。但是, 利用时间相关将需要记录整个的前一帧的 MV 域, 在实际执行中不理想, 所以, 我们使用空间相关性。

在空间域, 因为在一个视频帧中所有的块是以光栅扫描的顺序来处理的, 那么可以用来参考的相邻块就是位于相对于当前块左、上、左上和右上方向上的。其他方向上的块与当前块的相关性较差, 对于预测不可靠。因为使用越多的块计算复杂度越大, 所以需要考察 4 类模式, 如图 1。

通过计算 MV 的统计平均, 这 4 类产生的结果相差无几, 所以我们选择最简单的一种, 即类型 D。

### 3.3 搜索模式的选择

(1) 自适应模式, 用于初始搜索。十字模型的形状是对称的, 4 个搜索点分别位于 4 个顶点上, 如图 2。ARP 的主要结构是一个十字形状, 它的尺寸指的是从一个顶点到中心点之间的距离。十字形状的选择是基于对实际视频序列的运动特征的观察。MV 在水平和垂直方向上的分布比在其他方向上的分布概率要高, 这是因为相机的运动大部分是在这

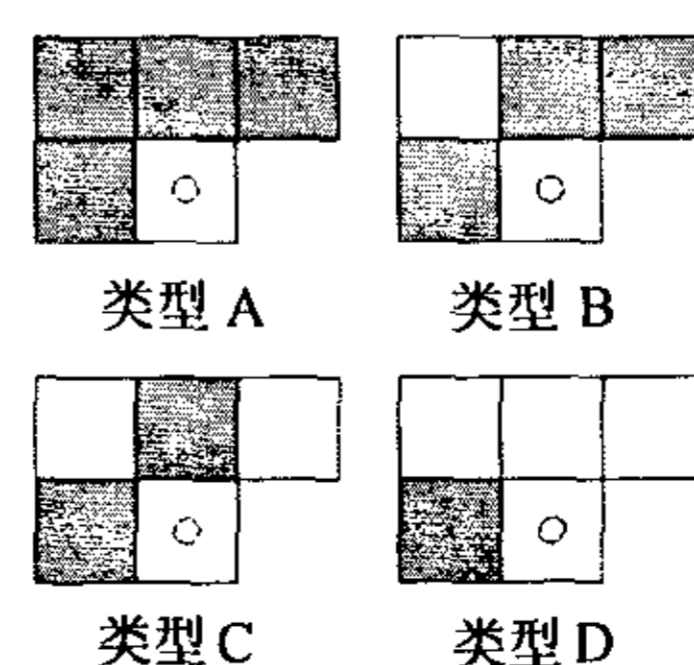


图 1 支持区域的 4 种类型用阴影表示; 当前块用圆圈标识

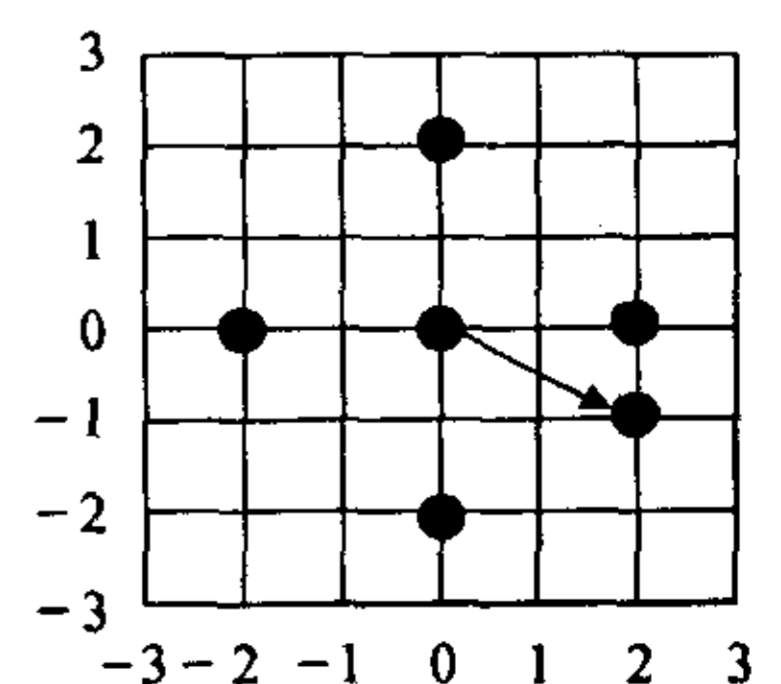


图 2 自适应十字模式

些方向上。而且,任何一个MV都可以分解为水平分量和垂直分量,对于一个有任意方向MV的运动对象,十字形状模式至少可以检测到运动对象的主要趋向,这就是初始搜索步骤想要达到的目的。

另外,除了这4个顶点外,在ARP中还加入了预测MV,因为它极可能与目标MV相似。这样,在初始步骤中检测到准确的运动的概率将增加。当预测MV在水平或者垂直方向上时,可能与4个指向顶点的MV中的一个相重叠。

在决定ARP的尺寸时,初始想法是让它等于预测MV的长度,也就是式(1):

$$\Gamma = \text{Round} |MV_{\text{predict}}| \\ = \text{Round} \left[ \sqrt{MV_{\text{predict}}^2(x) + MV_{\text{predict}}^2(y)} \right] \quad (1)$$

这里 $\Gamma$ 是ARP的大小, Round是舍入取整。 $MV_{\text{predict}}(x)$ 和 $MV_{\text{predict}}(y)$ 分别是预测(predict)MV的水平 and 垂直分量。为了简化处理,我们使用式(2)来决定ARP的大小:

$$\Gamma = \text{MAX}\{|MV_{\text{predict}}(x)|, |MV_{\text{predict}}(y)|\} \quad (2)$$

总之,自适应模式包括一个十字形状模式,并且计入了预测MV代表的那个点,所以,在初始搜索阶段,如果预测MV不为零,那么有5个或者4个(有重叠)搜索点需要检测,如果MV为零,那么仅有一个点需要检测。

(2) 固定模式,用于精确本地搜索。经过初步搜索以后,新的搜索中心位于整体最小BDM最可能存在的区域,减少了中间不必要的搜索路径。而且,错误曲面单峰的假设在这个区域将保持有效。所以,可以使用一个固定、简单且尺寸小的搜索模式来完成局部精确搜索。我们使用两种最简单的模式,一个是单位五点十字模式(URP),如图3(a),与DS中使用的SDSP一样;另一个是 $3 \times 3$ 正方形模式如图3(b)。后一种模式需要的检测点要多,故选用前一种模式。

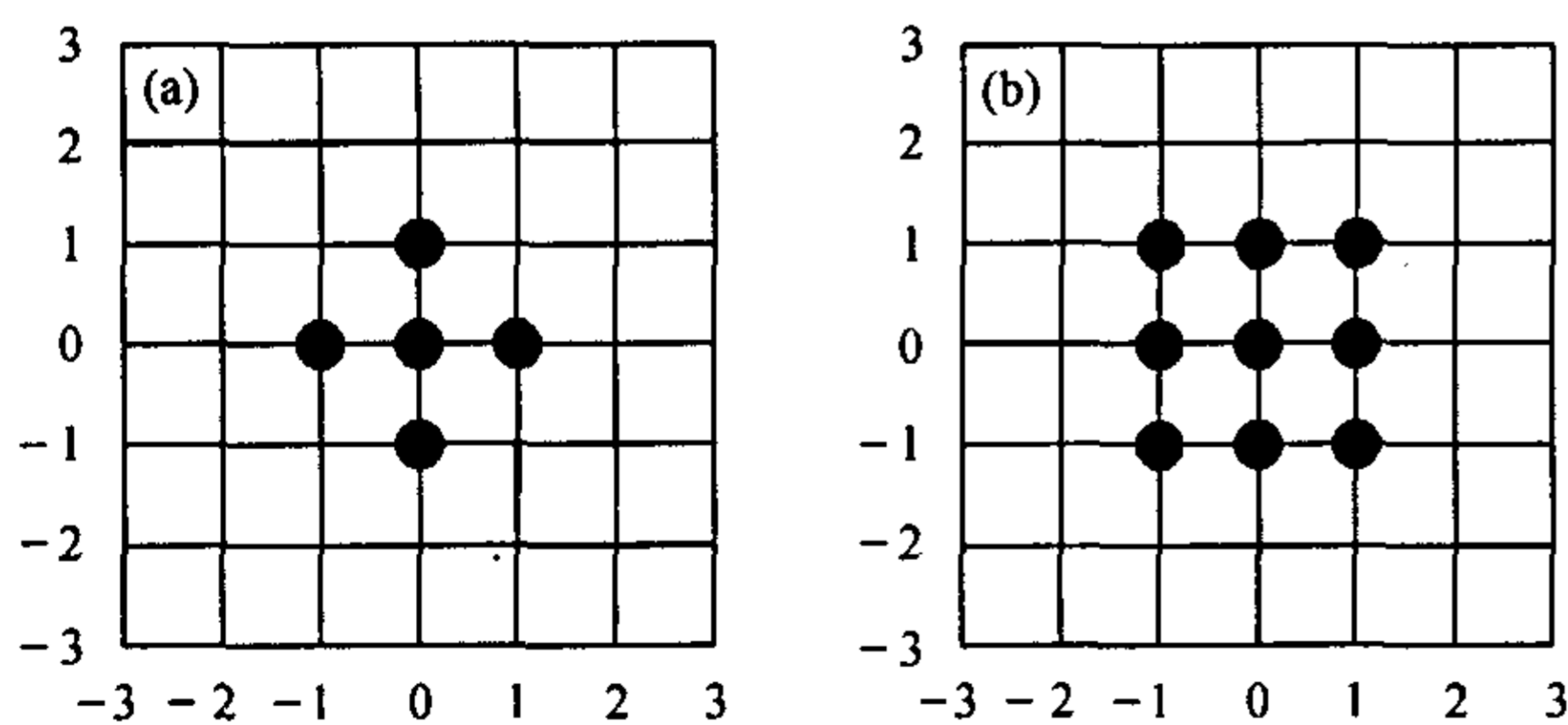


图3 两种固定模式

### 3.4 零运动预先判断(ZMP)

在很多视频通信应用中,在相邻帧之间有很小的运动,例如视频电话。所以在这类视频序列中有很大大一部分零运动块。那么,如果在ME的开始使用ZMP则可以减少很大一部分计算量。而且,这些不变块的平均匹配错误比运动块的要小。所以预先判别可以通过计算当前块与同一位置的参考块之间的匹配错误,然后将它与一个阈值 $T$ 相比较来实现。如果匹配错误小于阈值 $T$ ,那么当前块将被判别为不变块而

不执行以下的操作。

一般,大小为 $16 \times 16$ 的块用来执行ME,并用绝对差和(SAD)来作为块匹配判别,通过FS对几个测试序列的计算,一般不变MB的平均SAD在600~1300之间。因为高的阈值将产生大的预测错误,所以我们选择具有一定普遍性的 $T=512$ 。

### 3.5 ARPS-ZMP方法总结

步骤1 计算当前块与同一位置参考块之间的匹配错误 $SAD_{\text{center}}$ ,如果小于一个阈值 $T$ ,那么目标向量为零;否则,如果当前块是一个最左边的边界块,那么 $\Gamma=2$ ;如果不是边界块,那么,按照式(2)计算 $\Gamma$ ,然后进入步骤2。

步骤2 把ARP的中心对准搜索窗的中心点,然后检测4个搜索点以及预测MV代表的点来找到最小匹配错误(MME)点。

步骤3 设置前一步骤找到的最小点作为URP的中心点,然后检测它的搜索点,如果MME点在URP中心,那么停止搜索,此时的MV即为最后的MV。如果不是中心点,重复此步骤,直到MME为中心点。

## 4 仿真结果

我们通过对两个测试序列进行测试来比较FS, DS, ARPS和ARPS-ZMP这几种方法。计算重构的每一帧的平均PSNR来对比算法的质量,计算每个MV的产生所需要的平均检测点个数来对比搜索速度,然后通过计算DS、ARPS对FS的速度比率来对比DS、ARPS对FS的计算节省量。其中最大搜索移动范围为7个像素。如表1,表2所示。其仿真结果的PSNR对比如图4,图5所示。其中ARPS-ZMP的曲线与ARPS的差别甚微,所以我们仅仅作出了ARPS的曲线。

表1 4种方法的性能比较

序列	性能比较	FS	DS	ARPS	ARPS-ZMP
Tennis	平均搜索点(个数/MV)	255	11.48	7.74	7.67
	平均PSNR(dB/帧)	14.53	14.32	14.34	14.34
Mother & daughter	平均搜索点(个数/MV)	255	7.04	4.51	1.69
	平均PSNR(dB/帧)	11.72	11.61	11.61	11.61

表2 3种方法相对于FS的计算量的节省倍数

序列	DS对FS	ARPS对FS	ARPS-ZMP对FS
Tennis	22.21	32.95	33.25
Mother & daughter	36.22	56.54	150.89

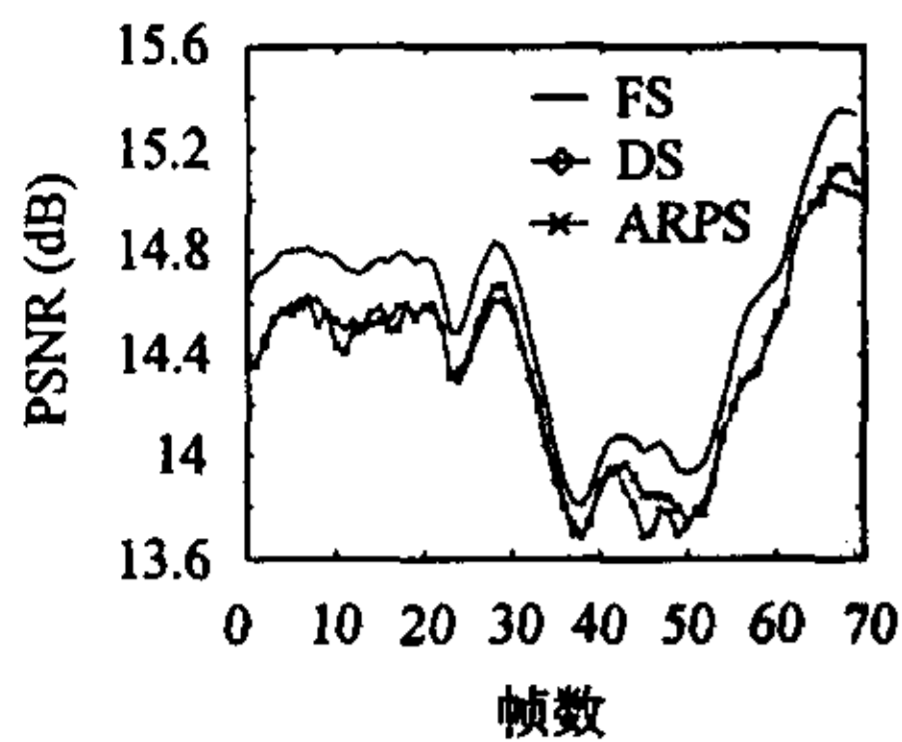


图 4 基于帧的序列 Tennis 的 PSNR 性能比较

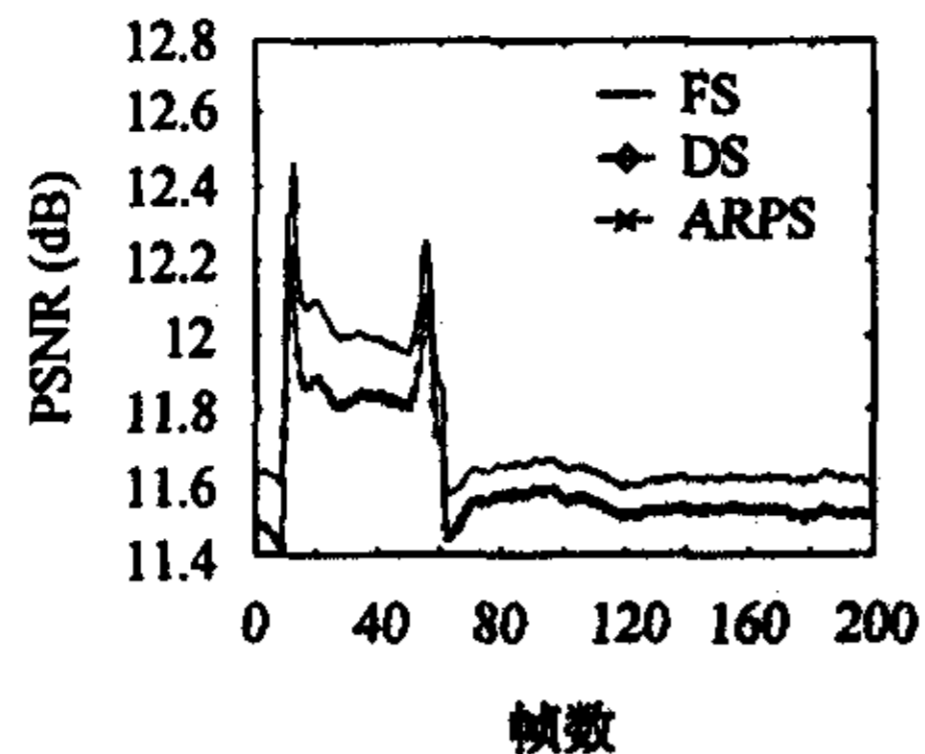


图 5 基于帧的序列 Mother & daughter 的 PSNR 性能比较

## 5 结论

本文提出了一种叫做自适应十字模式搜索 (ARPS) 的快速且简单的块匹配算法。通过利用 MV 在水平和垂直方向的高概率分布特性以及块之间的空间相关性, ARPS 使用一个可调整的十字形状搜索模式, 加入了预测 MV 所代表的搜索点来匹配不同的视频序列的运动内容。同时, 还使用了一种叫做零-运动预先判别的优化方法来加速 ARPS 的执行。与 FS 相比, ARPS-ZMP 比 DS 减少了更多的计算量, 改善了平均 PSNR, 在硬件实现中具有一定的优势。如果在大的运动视频序列中, 这种效果会更明显。所以 ARPS 是一种有效而且鲁棒的 ME 算法。

## 参考文献

[1] Jain J R, Jain A K. Displacement measurement and its application

in interframe image coding. *IEEE Trans. on Comm.*, 1981, 29(12): 1799 - 1808.

- [2] Koga T, Iinuma K, Hirano A, Iijima Y, Ishiguro T. Motion compensated interframe coding for video conferencing, in Proc. Nat. Telecommunication Conf., New Orleans, LA, Nov. 29-Dec. 3, 1981: G5.3.1-G5.3.5.
- [3] Li R, Zeng B, Liou M L. A new three-step search algorithm for block motion estimation. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech.*, 1994, 4(4): 438 - 442.
- [4] Po L M, Ma M C. A novel four-step search algorithm for fast block motion estimation. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech.*, 1996, 6(3): 313 - 317.
- [5] Tham J Y, Ranganath S, Ranganath M, Kassim A A. A novel unrestricted center-biased diamond search algorithm for block motion estimation. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech.*, 1998, 8(4): 369 - 377.
- [6] Liu L K, Feig E. A block-based gradient descent search algorithm for block motion estimation in video coding. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech.*, 1996, 6(4): 419 - 423.
- [7] Zhu S, Ma K K. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation. in Proc. 1997 Int. Conf. Information, Communications and Signal Processing (ICICS), Singapore, Sept. 9-12, 1997, vol.1: 292 - 296.

王晓燕: 女, 1979 年生, 硕士, 研究方向为移动通信。

郑建宏: 男, 1961 年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为移动通信。