第 34 卷第 8 期　　电 子 与 信 息 学 报　　Vol.34No.8
2012 年 8 月　　Journal of Electronics & Information Technology　　Aug. 2012

一种基于部分基矩阵稀疏约束非负矩阵分解的抵抗大强度剪切攻击视频水印构架

同 鸣*　张 伟　张建龙　陈 涛
(西安电子科技大学电子工程学院　西安　710071)

摘　要：该文提出一种部分基矩阵稀疏约束的非负矩阵分解(Non-negative Matrix Factorization with Sparseness Constraints on Parts of the Basis Matrix, NMFSCPBM)方法，其次将水印嵌入在 NMFSCPBM 分解后的基矩阵大系数中，利用 NMFSCPBM 提取视频运动特征自适应控制水印嵌入强度。最后，在水印检测时，只要残余视频中包含有视频最小剩余子块数，就可以恢复出完整基矩阵，进而提取出完整水印。实验表明，与同类方法相比，该方法抵抗强剪切攻击的能力获得了较大程度提升。

关键词：数字水印；剪切攻击；几何攻击；非负矩阵分解；稀疏约束
中图分类号：TP391　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2012)08-1819-08
DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01117

A Video Watermarking Framework Resistant to Super Strong Cropping Attacks Based on NMF with Sparseness Constraints on Parts of the Basis Matrix

Tong Ming　Zhang Wei　Zhang Jian-long　Chen Tao
(*School of Electronic Engineering*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: Firstly, the Non-negative Matrix Factorization with Sparseness Constraints on Parts of the Basis Matrix (NMFSCPBM) method is proposed in this paper. Secondly, the encrypted watermark is embedded into the big coefficients of the basis matrix by NMFSCPBM. At the same time, the watermark embedding strength is adaptively adjusted by the video motion characteristics extracted by NMFSCPBM. Finally, when detecting the watermark, as long as the residual video contains the numbers of least remaining sub-blocks, the complete basis matrix can be completely recovered, and then the complete watermark can be extracted. The experimental results show that the performance of resisting the strong cropping attacks of this paper is improved greatly compared with other similar methods.

Key words: Digital watermarking; Cropping attack; Geometric attacks; Non-negative Matrix Factorization (NMF); Sparseness constrain

1　引言

水印鲁棒性一直是多媒体领域研究者关注的焦点，如何抵抗几何攻击是研究的热点和难点[1]。随着各种视频信号处理工具的出现和成熟，人们可以更方便、更快捷、也更随意地对视频数据进行各种形式和不同程度的剪切、复制和篡改，尤其是强剪切攻击，嵌入水印信息直接被大量裁剪，如何在残余视频中恢复提取完整水印，一直是困扰水印研究者的难题[2]。文献[3]通过对原始视频的每一帧进行多级双树复小波分解，将水印嵌入在分解后的低频子带中，当遭受剪切攻击时，部分水印信息随之不可恢复的丢失，剪切强度越大，水印损失越严重。文献[4]通过将视频 I 帧沿行或列方向进行 8×8 亮度子块的 DCT 变换，并在每个亮度子块 DCT 变换的 1 维行或列向量中嵌入 1 位水印，在其它行或列向量中重复嵌入与第 1 行或第 1 列相同的水印。当遭遇剪切攻击时，只有剪切攻击方式与嵌入水印的行或列方向一致，且残余视频分块后仍然存在完整的行或列亮度子块，才能够提取出完整水印，该方法对于大强度剪切的方向选择性要求较高，鲁棒性不强。理论分析和实验表明，现有多数抵抗几何攻击的视频水印方法对于较小强度剪切具有一定鲁棒性，但对于强剪切攻击鲁棒性不足。

NMF(Non-negative Matrix Factorization)[5]是矩阵中所有元素为非负条件下的一种矩阵分解方

2011-10-28 收到，2012-04-24 改回
国家自然科学基金(61072110)，陕西省自然科学基金(SJ08F15)和陕西省工业攻关项目(2010K06-20)资助课题
*通信作者：同鸣　mtong@xidian.edu.cn

法，能够大大降低数据特征的维数，分解特性合乎人类视觉感知直观体验，分解结果具有可解释和明确的物理意义，自提出以来受到人们的广泛关注，已成功应用于模式识别和图像工程等领域[6–9]。目前已有学者提出了一些基于 NMF 的图像水印算法。文献[10]提出了一种基于 NMF 和 Contourlet 变换的鲁棒性图像水印方法，将水印嵌入在 NMF 分解后的系数矩阵奇异值中，当遭遇大强度剪切攻击时，系数矩阵的奇异值大幅度减小，由于系数矩阵无法由部分数据恢复出全局数据，剪切损失的水印无法恢复，不能抵抗强剪切攻击。文献[11]将水印 NMF 分解的系数矩阵奇异值嵌入在宿主图像 DWT (Discrete Wavelet Transform)后的 LL 和 HH 子带分块最大奇异值中，当遭遇大强度剪切攻击时，图像块能量大幅度减小，引起最大奇异值大幅度减小，导致提取的水印系数矩阵奇异值误差过大，无法恢复出原始水印。以上分析可知，该类方法在遭遇大强度剪切攻击时，水印信息损失严重，无法恢复。

本文提出了一种基于 NMFSCPBM(NMF with Sparseness Constraints on Parts of the Basis Matrix)的视频水印构架，基于基矩阵对于强剪切攻击的鲁棒性[12]，将水印嵌入在宿主视频 NMFSCPBM 分解后的基矩阵若干大系数中，利用视频运动特征系数自适应控制水印嵌入强度，能够抵抗大强度剪切攻击，实验证明了本文构架的有效性。

2 基于 NMFSCPBM 的完整基矩阵恢复及视频运动分量提取

文献[13]提出的 NMFSC(NMF with Sparseness Constraints)方法，在满足非负性的同时，用非线性投影算子把稀疏性约束添加在所有基矩阵上，实现了对稀疏性的精确控制，提高了分解结果的稀疏程度，但对所有基矩阵添加相同的高稀疏性约束，使得基矩阵过于稀疏，丢失了部分局部信息，在矩阵重构时导致分解误差变大，降低了数据的描述力。本文通过在部分基向量上添加可控制的稀疏性约束，提出了一种 NMFSCPBM 方法，在满足局部稀疏性的同时，减小了分解误差，有效解决了 NMFSC 当施加较高稀疏性限制时稀疏性和描述力之间的矛盾，降低了计算复杂度，减少了运算时间，提高了效率。

2.1 NMFSCPBM 方法的理论建模及收敛性证明

稀疏矩阵是指矩阵中大多数元素为 0 或接近 0，少数元素非 0，式(1)定义了一个向量的稀疏度大小，其中，n 为向量 $\boldsymbol{y}$ 的维数[13]。

$$\mathrm{sp}(\boldsymbol{y})=\left(\sqrt{n}-\left(\sum|\boldsymbol{y}_i|\right)\Big/\sqrt{\sum \boldsymbol{y}_i^2}\right)\Big/(\sqrt{n}-1) \tag{1}$$

那么，NMFSCPBM 方法转化为如下约束优化问题：给定一个 $m\times n$ 的非负矩阵 $\boldsymbol{B}$，求解 $m\times r$ 维基矩阵 $\boldsymbol{W}$ 和 $r\times n$ 维系数矩阵 $\boldsymbol{H}$，其中，r 为非负矩阵分解的维数。若定义原始矩阵与重构矩阵的欧式距离平方 D 作为目标评价函数，则 $\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 应满足式(2)条件，其中，$\boldsymbol{w}_i$ 为基矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的第 i 列，s_i 为期望得到的稀疏度。

$$\left.\begin{aligned}&\min\ \ D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2,\boldsymbol{W}\ge 0,\boldsymbol{H}\ge 0\\&\mathrm{sp}(\boldsymbol{w}_i)=s_i,\ i=1,2,\cdots,z(z<r)\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

这里先给出迭代过程中各参数的定义，其中，L 为迭代次数，s 为稀疏度，$\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}}$ 为待添加稀疏约束的矩阵，$\boldsymbol{w}_k$ 为 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}}$ 的第 k 列，$\mathrm{sp}(\boldsymbol{w}_k,s)$ 为向 $\boldsymbol{w}_k$ 添加稀疏度为 s 的稀疏约束，$\boldsymbol{w}_k'$ 为稀疏约束后的列向量，$\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}j}$ 为稀疏约束矩阵，$\mathbf{dw}$ 为中间变量，λ 为惩罚因子，β 为惩罚因子阈值，τ' 为目标函数收敛误差阈值，上标 T 为转置运算，那么，本文 NMFSCPBM 算法的迭代步骤描述如下：

算法输入：$\boldsymbol{B}$，r，L；输出：$\boldsymbol{W}$，$\boldsymbol{H}$。

步骤 1　初始化 β，令循环变量 $i=1$，同时随机初始化 $\boldsymbol{W}\ge 0$，$\boldsymbol{H}\ge 0$。

步骤 2　$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{H}\otimes\dfrac{(\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})}{(\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{WH})}$，$D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2$。

步骤 3　$\mathbf{dw}=(\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$，$\lambda$=1/2，$j=1$。

步骤 4　对 $\boldsymbol{W}$ 添加部分稀疏性约束，开始迭代。

(1) $\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}}=\boldsymbol{W}-\lambda\cdot\mathbf{dw}$；

(2) $\boldsymbol{w}_k'=\mathrm{sp}(\boldsymbol{w}_k,s),k=1,\cdots,z,(z<r)$；

(3) $D\left(\boldsymbol{B},\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}j}\boldsymbol{H}\right)=\left\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}j}\boldsymbol{H}\right\|_F^2$；

(4) 若 $D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}j}\boldsymbol{H})<D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})$ 或 $\lambda<\beta$，则 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}j}$，转步骤 5；否则转步骤 4(1)，$\lambda=\lambda/2$，$j=j+1$。

步骤 5　若 $\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2<\tau'$ 或 $i=L$，退出；否则转步骤 2，$i=i+1$。

以下证明本文 NMFSCPBM 的收敛性，这里先给出定理 1 并证明其收敛。

定理 1　给定非负矩阵 $\boldsymbol{B}\in\mathbf{R}^{m\times n}$ 和正整数 $r<\min(m,n)$，r 满足 $(m+n)r<mn$，证明由 NMFSCPBM 方法分解得到的基矩阵 $\boldsymbol{W}\in\mathbf{R}^{m\times r}$ 和系数矩阵 $\boldsymbol{H}\in\mathbf{R}^{r\times n}$，能够使得目标函数 $D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2$ 收敛。

由于 NMFSCPBM 系数矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的迭代规则和 NMF 相同，而 NMF 对于目标函数 $D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})$ 的收敛性已证明[5]，这里仅需要证明基矩阵 $\boldsymbol{W}$ 对于目标函数的收敛性。本文 NMFSCPBM 对基矩阵 $\boldsymbol{W}$ 逐列添加稀疏性约束且每一列添加稀疏约束相互独

立，在此先证明第 1 列添加稀疏约束的收敛性。

令 $\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{x}_1\ \boldsymbol{x}_2\ \cdots\ \boldsymbol{x}_r]$，$\boldsymbol{W}=[\boldsymbol{w}_1\ \boldsymbol{w}_2\ \cdots\ \boldsymbol{w}_r]$，根据不完全归纳法，第 n 次迭代时，由步骤 4(1)得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}}&=\boldsymbol{W}-\lambda^n\boldsymbol{X}\\&=[\boldsymbol{w}_1-\lambda^n\boldsymbol{x}_1\ \ \boldsymbol{w}_2-\lambda^n\boldsymbol{x}_2\ \cdots\ \boldsymbol{w}_r-\lambda^n\boldsymbol{x}_r]\end{aligned}\tag{3}$$

令 $\boldsymbol{w}_{sn}=\mathrm{sp}(\boldsymbol{w}_1-\lambda^n\boldsymbol{x}_1,s)$，则 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}=[\boldsymbol{w}_{sn}\ \ \boldsymbol{w}_2-\lambda^n\boldsymbol{x}_2\ \cdots\ \boldsymbol{w}_r-\lambda^n\boldsymbol{x}_r]$，由文献[14]知，$\boldsymbol{w}_{sn}$ 无限逼近于 $(\boldsymbol{w}_1-\lambda^n\boldsymbol{x}_1)$，因此有

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}&\approx[\boldsymbol{w}_1-\lambda^n\boldsymbol{x}_1\quad \boldsymbol{w}_2-\lambda^n\boldsymbol{x}_2\quad\cdots\quad\boldsymbol{w}_r-\lambda^n\boldsymbol{x}_r]\\&=\boldsymbol{W}-\lambda^n\boldsymbol{X}\end{aligned}\tag{4}$$

将 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}$ 代入目标函数 $D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2$，得

$$\begin{aligned}D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}\boldsymbol{H})&=\left\|\boldsymbol{B}-(\boldsymbol{W}-\lambda^n\boldsymbol{X})\boldsymbol{H}\right\|_F^2\\&=\left\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}+\lambda^n\boldsymbol{XH}\right\|_F^2\\&\le\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2+\left\|\lambda^n\boldsymbol{XH}\right\|_F^2\\&=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2+\lambda^n\|\boldsymbol{XH}\|_F^2\end{aligned}\tag{5}$$

事实上，式(5)第 1 项 $\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2$ 收敛[5]，对于第 2 项 $\lambda^n\|\boldsymbol{XH}\|_F^2$，有

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{XH}\|_F^2&=\left\|(\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right\|_F^2\le\|\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B}\|_F^2\\&\cdot\left\|\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right\|_F^2\le\|\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B}\|_F^2\cdot\left\|\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\right\|_F^2\cdot\|\boldsymbol{H}\|_F^2\end{aligned}\tag{6}$$

由于 $\|\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B}\|_F^2=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2$，因此 $\|\boldsymbol{WH}-\boldsymbol{B}\|_F^2$ 收敛。又因为 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}$ 为收敛矩阵且当 $\lambda=1/2$ 时，$\lim\limits_{n\to\infty}\lambda^n\|\boldsymbol{XH}\|_F^2\to 0$，因此，$\lambda^n\|\boldsymbol{XH}\|_F^2$ 收敛，那么有 $D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}\boldsymbol{H})=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}\boldsymbol{H}\|_F^2$ 收敛。由 NMFSCPBM 的迭代过程知，$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{W}_{\mathrm{new}n}$，所以，目标函数 $D(\boldsymbol{B},\boldsymbol{WH})=\|\boldsymbol{B}-\boldsymbol{WH}\|_F^2$ 收敛。

至此已经证明了本文 NMFSCPBM 当第 1 列添加稀疏约束时的收敛性。若对于其它列添加约束，由于每一列添加约束时相互独立，同理可证得其收敛性，因此，本文 NMFSCPBM 的收敛性已证明。

2.2 基于最小剩余子块的完整基矩阵恢复

定义　视频最小剩余子块数。指合成视频遭受强剪切攻击后，从残余视频中恢复出完整基矩阵所需要的最少完整视频子块数。

设 NMF 的基本模型为 $\boldsymbol{B}_{m\times n}=\boldsymbol{W}_{m\times r}\times\boldsymbol{H}_{r\times n}$，令 $\boldsymbol{b}_i$ 为 $\boldsymbol{B}$ 的第 i 列，$\boldsymbol{h}_i$ 为 $\boldsymbol{H}$ 的第 i 列，则有 $\boldsymbol{B}_{m\times n}=[\boldsymbol{b}_1,\boldsymbol{b}_2,\cdots,\boldsymbol{b}_n]$，$\boldsymbol{H}_{r\times n}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_n]$，代入得

$$[\boldsymbol{b}_1,\boldsymbol{b}_2,\cdots,\boldsymbol{b}_n]=\boldsymbol{W}_{m\times r}\cdot[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_n]\tag{7}$$

如图 1，首先对视频进行分块预处理，分块规则如下：将原始视频 $\boldsymbol{V}$ 沿时间轴分解为 $a\times a\times K$ 的子块，每个子块展开成 1 维序列，作为待分解的非负矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的一列，设 $\boldsymbol{C}_j$ 为 $\boldsymbol{V}$ 的第 j 个子块，如式(8)，其中 $\lfloor\cdot\rfloor$ 表示向下取整操作，mod() 表示求余操作，K

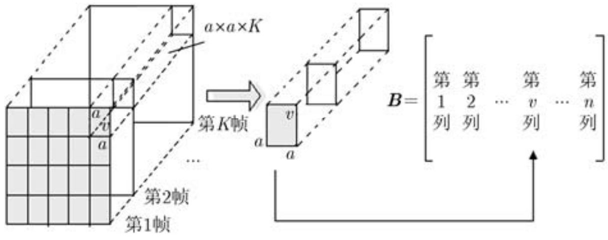

图 1 本文构架视频分块示意图

为视频帧数，$i=1,2,\cdots,Ka^2,k=1,2,\cdots,K$。

$$\boldsymbol{B}(i,j)=\begin{cases}\boldsymbol{C}_j\left(\mathrm{mod}(i,a),\lfloor i/a\rfloor-a\times(k-1),k\right),\\ \qquad\qquad\qquad\qquad\mathrm{mod}(i,a)\ne 0\\ \boldsymbol{C}_j\left(a,\lfloor i/a\rfloor-a\times(k-1),k\right),\ \ \mathrm{mod}(i,a)=0\end{cases}\tag{8}$$

事实上，剪切攻击可发生在视频任何位置。若所在位置视频子块遭受强剪切攻击，则对数据矩阵中的相应数据直接置 0，如图 2 所示。

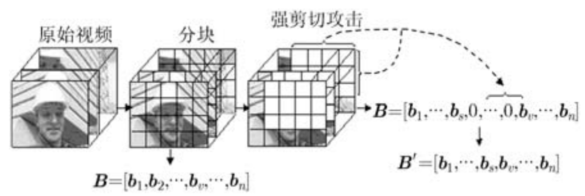

图 2 视频遭受强剪切攻击示意图

设强剪切攻击后的剩余完整子块数为 c，为方便将剩余完整子块按分块顺序重新排列为 $1,2,\cdots,c$，其中 r 为分解维数，此时剩余子块对应的数据矩阵 $\boldsymbol{B}'$，系数矩阵 $\boldsymbol{H}'$ 和基矩阵 $\boldsymbol{W}$ 分别为：$\boldsymbol{B}'=\begin{bmatrix}b_{11}&b_{12}&\cdots&b_{1c}\\b_{21}&b_{22}&\cdots&b_{2c}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\b_{m1}&b_{m2}&\cdots&b_{mc}\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{H}'=\begin{bmatrix}h_{11}&h_{12}&\cdots&h_{1c}\\h_{21}&h_{22}&\cdots&h_{2c}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\h_{r1}&h_{r2}&\cdots&h_{rc}\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}w_{11}&w_{12}&\cdots&w_{1r}\\w_{21}&w_{22}&\cdots&w_{2r}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\w_{m1}&w_{m2}&\cdots&w_{mr}\end{bmatrix}$，根据式(7)有

$$\boldsymbol{B}'=\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{H}'\tag{9}$$

式(9)表明，在视频遭受强剪切攻击后，通过式(8)就可以得到 $\boldsymbol{B}'$，然后根据 NMFSCPBM 的迭代规则就可以求得 $\boldsymbol{H}'$ 和完整的基矩阵 $\boldsymbol{W}$，因此，存在以下定理 2。

定理 2　在合成视频遭受强剪切攻击后，只要残余视频中包含有视频最小剩余子块数且满足

$c \geq r$，就能够从残余视频中唯一、正确性地恢复出完整基矩阵$\boldsymbol{W}$。

以下证明定理 2 成立。式(9)两边转置，得

$$\boldsymbol{H}'^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{B}'^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

令 $\boldsymbol{w}_i' = [w_{i1}\ w_{i2}\ \cdots\ w_{ir}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{b}_i' = [b_{i1}\ b_{i2}\ \cdots\ b_{ic}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{H}'^{\mathrm{T}}$，将$\boldsymbol{B}', \boldsymbol{H}'$和$\boldsymbol{W}$代入式(10)，得式(11)。

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}_i' = \boldsymbol{b}_i', \quad i \in [1, m] \tag{11}$$

其中$\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{w}_1'\ \boldsymbol{w}_2'\ \cdots\ \boldsymbol{w}_m']$待求解，$\boldsymbol{A}$为各方程组的系数矩阵。

由非负矩阵分解的唯一性可知，$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}_i' = \boldsymbol{b}_i'$有解且只有唯一解。事实上，$r$元齐次线性方程组有唯一解的充分必要条件为：$R(\boldsymbol{A}) = R(\overline{\boldsymbol{A}}) = r$，其中，$\overline{\boldsymbol{A}} = [\boldsymbol{A}\ \boldsymbol{b}_i'] = [\boldsymbol{H}'^{\mathrm{T}}\ \boldsymbol{b}_i']$为$\boldsymbol{A}$的增广矩阵，$R(\boldsymbol{A})$和$R(\overline{\boldsymbol{A}})$分别为$\boldsymbol{A}$和$\overline{\boldsymbol{A}}$的秩，且$R(\boldsymbol{A}) \leq \min(r, c)$，$R(\overline{\boldsymbol{A}}) \leq \min(r+1, c)$，分 3 种情况：(1)若$c < r$且$R(\boldsymbol{A}) = R(\overline{\boldsymbol{A}}) \leq c < r$时，$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}_i' = \boldsymbol{b}_i'$有无穷多解；(2)若$c \geq r$且$R(\boldsymbol{A}) = R(\overline{\boldsymbol{A}}) < r$时，$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}_i' = \boldsymbol{b}_i'$亦有无穷多解；这两种情况均不符合非负矩阵分解的唯一性原则，解舍去。(3)若$c \geq r$且$R(\boldsymbol{A}) = R(\overline{\boldsymbol{A}}) = r$时，$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w}_i' = \boldsymbol{b}_i'$有唯一解。由此可知，当$c \geq r$且$R(\boldsymbol{A}) = R(\overline{\boldsymbol{A}}) = r$时，$\boldsymbol{w}_1', \boldsymbol{w}_2', \cdots, \boldsymbol{w}_m'$有唯一解，即基矩阵$\boldsymbol{W}$有唯一解。也就是说，在视频遭受强剪切攻击后，若残余视频中包含有视频完整子块且数量满足$c \geq r$，就可以从残余视频中唯一、正确性地恢复出完整基矩阵$\boldsymbol{W}$，即定理 2 成立。

2.3 基于 NMFSCPBM 的视频运动分量提取

对视频进行非负矩阵分解可得到基矩阵和系数矩阵，基矩阵代表了视频的主要特征，系数矩阵是非负矩阵在基矩阵上的线性投影，代表了视频的局部特征权值。由于视频可以看成静止分量与运动分量的线性加权和，其中运动分量是稀疏的，静止分量是非稀疏的，因此，可以通过控制基矩阵的稀疏性约束使运动分量和静止背景分离，以提取运动分量。本文 NMFSCPBM 提取运动分量的过程包括：

(1)视频预处理　将原始视频$\boldsymbol{V}(m_x \times m_y \times K)$以待提取的运动分量目标帧为中心，前后各取$l$个视频帧，将这$2l+1$个视频帧组成视频帧组$\boldsymbol{V}'$，并把$\boldsymbol{V}'$ 1维展开作为矩阵$\boldsymbol{B}$的一列，如式(12)。

$$\boldsymbol{B}(i,j) = \boldsymbol{V}'\left(\lfloor i/m_x \rfloor, \mathrm{mod}(i, m_x), j\right) \tag{12}$$

其中$i = 1, 2, \cdots, m_x m_y$，$j = 1, 2, \cdots, 2l+1$，视频帧大小为$m_x \times m_y$。若$l$选择过大，则计算量明显增加，若$l$选择过小，则视频帧之间无明显运动信息。

(2)NMFSCPBM 分解　设r为分解维数，对$\boldsymbol{B}$进行 NMFSCPBM 分解，对$(r-1)$个基向量添加稀疏性约束，这样添加了稀疏约束的基向量$\boldsymbol{w}_i (i = 1, 2, \cdots, r-1)$就代表了视频的运动分量[13]。

(3)求解视频运动分量　对$(r-1)$个运动分量加权求和，得到目标帧的运动分量，如式(13)。

$$\boldsymbol{M} = \sum_{i=1}^{r-1} \boldsymbol{w}_i \boldsymbol{H}_{i,l+1} \tag{13}$$

其中$\boldsymbol{H}_{i,l+1}$为基向量$\boldsymbol{w}_i$对应目标帧的加权系数。$\boldsymbol{M}$中元素值越大，目标帧对应像素的运动越剧烈。

为了量化评估本文运动分量提取的有效性，采用匹配率τ进行评价[15]，如式(14)。

$$\tau = \frac{\displaystyle\sum_{x,y \in R} \boldsymbol{I}(x,y) \times \mathbf{SMD}(x,y)}{\sqrt{\displaystyle\sum_{x,y \in R} \boldsymbol{I}(x,y) \times \boldsymbol{I}(x,y)} \cdot \sqrt{\displaystyle\sum_{x,y \in R} \mathbf{SMD}(x,y) \times \mathbf{SMD}(x,y)}} \tag{14}$$

其中$\mathbf{SMD}(x,y)$为提取的运动分量，$\boldsymbol{I}(x,y)$是人为指定的目标运动区域，$\boldsymbol{R}$为目标帧。τ越接近 1，表示提取的运动特征与指定运动区域越匹配，当提取的运动特征和指定运动区域完全相同时，$\tau = 1$。

实验选用 hall, stefan, tennis 作为测试视频(http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html)，分别计算本文 NMFSCPBM 与 NMFSC[13], NMF[5]对测试视频 hall 第 25, 55 两帧；视频 stefan 第 26, 30 两帧及视频 tennis 第 16, 18 两帧的匹配率，实验设定$l = 5$，结果如图 3。可以看出，本文对于测试视频的匹配率τ较其他方法更接近 1，本文匹配率平均为 0.8907, NMF 为 0.5371, NMFSC 为 0.4070。

3　水印的嵌入和提取

由于基矩阵具有部分感知全局的智能特性，适用于强剪切攻击下的水印恢复，本文在提出 NMFSCPBM 的基础上，设计了完整的水印构架。

水印嵌入。非负矩阵分解的重要特点在于基矩

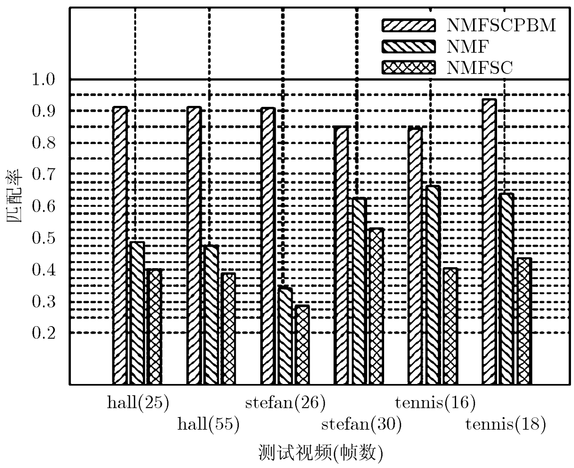

图 3 NMFSCPBM 与同类方法提取的运动分量匹配率对比

阵可以改变[8]且对于强剪切攻击鲁棒[12]，所以，本文构架将水印添加在宿主视频NMFSCPBM分解的基矩阵若干大系数中，在合成视频遭受强剪切攻击时，只要残余视频中包含有视频最小剩余子块数，就可以恢复出完整基矩阵$\boldsymbol{W}'$，进一步提取出完整水印，本文水印嵌入原理见图 4。

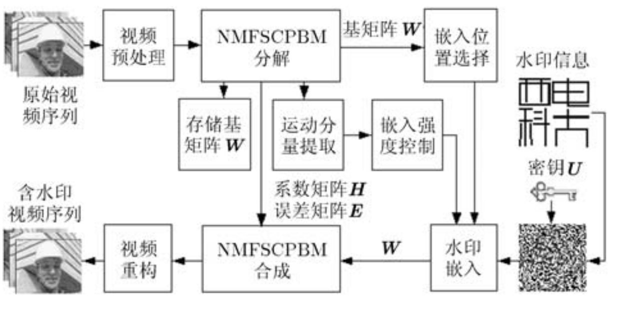

图 4 本文构架水印嵌入原理图

(1)视频预处理　按照本文 2.2 节分块规则，对原始视频$\boldsymbol{V}(m_x \times m_y \times K)$进行处理，得非负矩阵$\boldsymbol{B}$。

(2)对矩阵$\boldsymbol{B}$进行 NMFSCPBM 分解　由式(15)计算分解误差，保存$\boldsymbol{W}$用于水印提取。

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{B} - \boldsymbol{W}\boldsymbol{H} \tag{15}$$

(3)水印加密　利用伪随机序列$\boldsymbol{U}$对水印$\boldsymbol{S}$进行加密，得到秘密信息$\boldsymbol{P}$，如式(16)，$\boldsymbol{U}$留作密钥。

$$\boldsymbol{P}(k) = \sum_{t=1}^{l} s_t(k) u_t(k), \quad k = 1,2,\cdots,N \tag{16}$$

(4)嵌入水印　本文构架选择基矩阵$\boldsymbol{W}$中的N个大系数$w_1, w_2, \cdots, w_N$作为水印待嵌入位置，采用式(17)乘法规则嵌入，其中p_n为$\boldsymbol{P}$的第n位，I为水印嵌入强度，得到含水印的基矩阵$\boldsymbol{W}'$。

$$w_n' = w_n \cdot (1 + I \cdot p_n) \tag{17}$$

(5)自适应控制水印嵌入强度　根据本文 2.3 节提取运动分量$\boldsymbol{M}$，根据式(18)计算第i个系数所在行的运动特征系数$F(w_i)$，那么，第i个系数的水印嵌入强度为$I(w_i) = \alpha \cdot F(w_i), i = 1,2,\cdots,N$，其中，$\alpha$为运动掩蔽加权因子，实验选取$\alpha = 0.013$。

$$F(w_i) = (a^2 / m_x m_y) \sum_j \boldsymbol{M}(i,j) \tag{18}$$

(6)非负矩阵合成　即$\boldsymbol{B}' = \boldsymbol{W}'\boldsymbol{H} + \boldsymbol{E}$。

(7)视频重构　根据分块规则对$\boldsymbol{B}'$进行重构，输出含水印合成视频。

水印提取。首先按照本文 2.2 节对合成视频进行分块预处理，得到由残余视频中的剩余完整子块构成的非负矩阵$\boldsymbol{B}''$；然后对$\boldsymbol{B}''$进行 NMFSCPBM 分解，求得残余视频中含水印的完整基矩阵$\boldsymbol{W}'$；最后比较$\boldsymbol{W}$与$\boldsymbol{W}'$，依据式(19)提取水印，用$\boldsymbol{U}$解密。

$$p = \begin{cases} 0, & w \ge w' \\ 1, & w < w' \end{cases} \tag{19}$$

本文构架水印提取不需要原始视频，属盲水印。

4　实验结果与分析

为了验证本文构架的有效性，实验分别选择 CIF 格式的 mother-daughter, football, tempete, mobile, akiyo, hall, foreman 和 soccer 作为宿主测试视频(http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html)，长度分别为 300 帧、260 帧、260 帧、300 帧、300 帧、300 帧、300 帧和 300 帧，水印为64×64的二值图像(西电科大)，子块大小8×8，非负矩阵分解维数$r = 32$，软件环境为 matlab7.2。实验分别进行了透明性、码速率恒定性、鲁棒性、实时性和算法效率等多方面的测试和分析，限于篇幅仅列出了部分结果，实验同步对文献[3]进行了相同种类和强度的攻击测试。

4.1　强剪切攻击鲁棒性测试

鲁棒性实验结果通过提取水印的正确检测率 BCR 进行评估，如式(20)。

$$\mathrm{BCR} = (e/m) \times 100\% \tag{20}$$

其中e为正确提取水印的比特数，m为提取水印的总比特数。BCR 越接近 100%，提取水印的正确率越高。实验选取阈值$T = 70\%$，若$\mathrm{BCR} > T$，则检测到水印。图 5 和表 1 为部分图例和测评结果。

可以看出：(1)本文构架对于各种类型的规则及不规则强剪切攻击，BCR 值均为 100%，能够无损恢复完整水印，抵抗强剪切攻击的能力强。分析原因在于，本文构架基于基矩阵对于剪切攻击的鲁棒性，将水印嵌入在 NMFSCPBM 分解的基矩阵中，在遭遇强剪切攻击时，只要满足定理 2 的条件，就可以通过对残余视频的 NMFSCPBM 分解，求得完整基矩阵，进一步提取出完整水印；基矩阵大系数的选择和水印嵌入强度的自适应控制，进一步加大了水印的嵌入强度，提高了鲁棒性；水印的加密处理，增强了隐蔽性和鲁棒性。(2)对于实验所列各种强剪切攻击，文献[3] BCR 值均达不到 70%的阈值要求。

图 6 显示了本文构架 BCR 值随剪切强度变化的曲线。可以看出，BCR 值小于 100%的拐点出现在剪切强度为 97.98%处，表 1 显示此时剪切强度最大且残余视频剩余完整子块数为$c = 32$，恰好等于非负矩阵分解的维数$r = 32$，与本文 2.2 节理论分析完全吻合。进一步可以看出，随着剪切强度的进一步加大，BCR 值迅速下降，主要原因在于残余视频中含有的剩余完整子块数$c < 32$，不满足定理 2

(a)原始视频和原始水印 (b)合成视频和未攻击提取的水印 (c)上边角剪切95.01%, BCR为100%

(d)行列剪切97.98%, BCR为100% (e)行列剪切96.72%, BER为100% (f)边缘剪切97.73%, BCR为100%

(g)不规则剪切93.99%, BCR为100% (h)不规则剪切93.60%, BCR为100% (i)不规则剪切97.00%, BCR为100%

图 5 本文构架抵抗强剪切攻击实验图例

表 1 本文构架与文献[3]强剪切攻击实验数据 BCR(%)

攻击类型及剪切强度(%)	mother-daughter		football		tempete		mobile		akiyo		hall		foreman		soccer	
	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]	本文	文献[3]
未攻击	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
行剪切 97.22	100	51.36	100	50.57	100	52.78	100	50.97	100	47.85	100	51.29	100	54.10	100	53.27
列剪切 97.73	100	54.15	100	53.09	100	53.41	100	51.26	100	48.99	100	47.26	100	53.34	100	51.77
行列剪切 97.98	100	49.58	100	51.58	100	49.09	100	51.77	100	51.77	100	49.33	100	48.75	100	49.85
边缘剪切 97.73	100	50.36	100	49.75	100	52.90	100	50.23	100	52.27	100	49.36	100	49.03	100	48.76
上边角剪切 95.01	100	49.56	100	50.44	100	52.71	100	51.45	100	51.59	100	50.45	100	52.01	100	50.31
下边角剪切 95.01	100	48.98	100	47.85	100	51.64	100	51.36	100	52.02	100	49.56	100	52.89	100	51.25
中心剪切 93.56	100	50.25	100	52.46	100	50.69	100	49.85	100	49.26	100	50.19	100	54.99	100	49.12
不规则剪切 93.99	100	52.71	100	52.80	100	53.26	100	50.33	100	52.71	100	51.07	100	52.16	100	50.51
不规则剪切 93.60	100	50.76	100	51.96	100	52.53	100	51.25	100	51.07	100	49.88	100	51.65	100	54.33
不规则剪切 97.00	100	55.26	100	54.92	100	57.07	100	56.31	100	54.17	100	48.69	100	50.78	100	51.07

中的最小剩余子块数要求，使得正确提取水印的比特数e迅速减少，引起BCR值迅速降低，与文中2.2节理论分析完全一致。

4.2 常见视频帧攻击测试

对本文进行的帧攻击测试种类包括：帧插入、帧删除、帧重组和帧平均，结果见表2。可以看出，本文对于常见的视频帧攻击亦具有一定的鲁棒性。

水印嵌入容量估计。本文是在宿主载体NMFSCPBM分解的基矩阵若干大系数中嵌入水印，水印容量主要由基矩阵大系数的大小和数量决定，大系数越多，容量越大，但嵌入水印越多，PSNR值下降越多，码速率增加越多。为了获得较大的容

表 2　本文构架常见视频帧攻击测试数据 BCR(%)

帧攻击(%)	mother-daughter	football	tempete	mobile	akiyo
未攻击	100	100	100	100	100
帧插入(10)	88.70	92.14	85.55	91.46	89.36
帧插入(20)	83.25	86.82	81.98	86.67	83.98
帧删除(10)	87.04	90.21	91.55	91.41	88.26
帧删除(20)	82.86	82.67	83.72	81.81	84.30
帧重组(10)	87.08	90.33	91.36	91.60	88.82
帧重组(20)	82.93	80.40	83.89	82.08	84.08
帧平均(10)	87.08	89.92	92.16	91.26	88.35
帧平均(20)	82.40	80.52	84.40	81.91	82.01

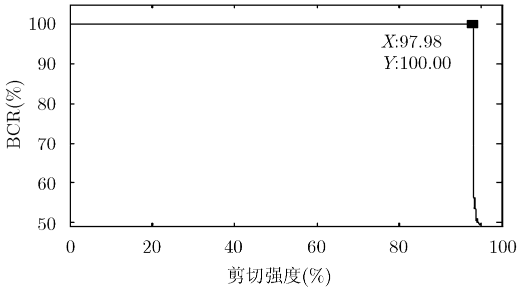

图 6　本文构架 BCR 值随剪切强度的变化曲线

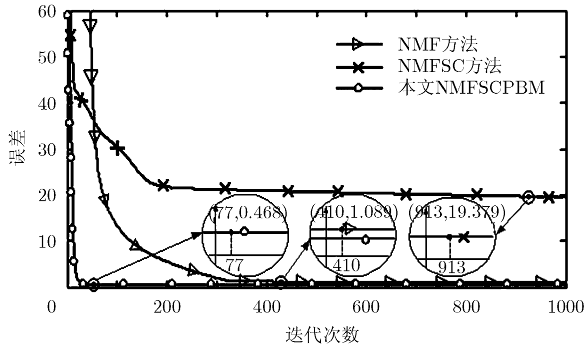

图7　本文NMFSCPBM与同类方法分解误差收敛曲线

量，同时保证视频质量，本文构架在每个基矩阵大系数中可嵌入 1~6 bit 的水印，这意味着 23.20 Mbit/s 的视频 mother-daughter，最大可以 12.76 kbit/s 的速度嵌入水印。不同测试视频，基矩阵大系数的大小和数量不同，容量也不同。

4.3　本文NMFSCPBM计算效率与分解误差测试

图7分别给出了本文NMFSCPBM, NMF和NMFSC对于不同数据集的分解误差随迭代次数变化的收敛曲线，其中，NMFSC和NMFSCPBM分别施加了$s=0.6$的稀疏性约束，分解维数$r=4$，受篇幅限制，仅列出了测试视频mother-daughter前1000次迭代的结果。从实验数据可以看出：(1)本文收敛误差为0.468, NMFSC为19.379, NMF为1.089；(2)本文经过77次迭代后收敛到最小误差，NMFSC经过913次收敛到最小误差，NMF经过410次收敛到最小误差。故本文分解误差在同类方法中最低，收敛速度也优于同类方法。

5　结论

本文构架具有以下特点：(1)提出了一种改进的NMFSCPBM 方法，能够准确提取视频运动特征，滤除了静止背景干扰，降低了分解误差，提高了计算效率。(2)基于基矩阵对于剪切攻击的鲁棒性，创新性地将水印嵌入在宿主视频NMFSCPBM分解的基矩阵大系数中，利用 NMFSCPBM 方法提取视频运动特征并自适应控制水印嵌入强度，在遭受强剪切攻击时，只要残余视频中包含有完整的视频最小剩余子块数，就能够恢复出完整基矩阵，从而提取出完整水印，较同类方法相比，抵抗强剪切攻击的能力获得了较大程度提升。

参 考 文 献

[1] Zhang H, Shu H Z, Coatrieux G, *et al.*. Affine legendre moment invariants for image watermarking robust to geometric distortions [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2189–2199.

[2] Serdean C V, Ambroze M A, Tomlinso M, *et al.*. DWT-based high-capacity blind video watermarking, invariant to geometrical attacks[J]. *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Proceeding*, 2003, 150(1): 51–58.

[3] Coria L E, Pickering M P, Nasiopoulos P, *et al.*. A video watermarking scheme based on the dual-tree complex wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(3): 466–474.

[4] Wang Y L and Pearmain A. Blind MPEG-2 video watermarking robust against geometric attacks: a set of approaches in DCT domain [J]. *IEEE Transactions on*

Image Processing, 2006, 15(6): 1536–1543.

[5] Lee D D and Seung H S. Algorithms for non-negative matrix factorization[C]. Proceedings of Neural Information Processing Systems Conference, Vancouver, Canada, MIT Press, 2000: 556–562.

[6] Yang Z Y, Zhou G X, Xie S L, *et al*.. Blind spectral unmixing based on sparse nonnegative matrix factorization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(4): 1112–1125.

[7] Angela D A, Li Zhao-ping, and Mauro B. A full-reference quality metric for geometrically distorted images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(4): 867–881.

[8] Gai D, He X, Han J, *et al*.. Graph regularized nonnegative matrix factorization for data representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(8): 1548–1560.

[9] 高涛, 何明一. 改进投影梯度非负矩阵分解的单训练样本特征提取研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1121–1125.
Gao Tao and He Ming-yi. Using improved non-negative matrix factorization with projected gradient for single-trial Feature extraction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1121–1125.

[10] Silja M S and Soman K P. A watermarking algorithm based on contourlet transform and nonnegative matrix factorization[C]. International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, Kottayam, Kerala, 2009, 198: 279–281.

[11] Ma L and Song S. Improved image watermarking scheme using nonnegative matrix factorization and wavelet transform[C]. International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, 2009: 1–5.

[12] 同鸣, 闫涛, 姬红兵. 一种抵抗强剪切攻击的鲁棒性数字水印[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 22–27.
Tong Ming, Yan Tao, and Ji Hong-bing. Strong anti-robust watermarking algorithm[J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(1): 22–27.

[13] Hoyer P O. Non-negative matrix factorization with sparseness constraints[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2004, 5(9): 1457–1469.

[14] Kurt S, Fabin J T, and Carlos G P. Extended sparse nonnegative matrix factorization[J]. *Computational Intelligence and Bioinspired Systems*, 2005, 3512: 249–256.

[15] Kim T K, Im J H, and Paik J K. Video object segmentation and its salient motion detection using adaptive background generation[J]. *IET Electronics Letters*, 2009, 45(11): 542–543.

同 鸣： 女，1963年生，博士后，教授，研究方向为图像工程与多媒体信号处理、信息隐藏与数字水印.

张 伟： 男，1987年生，硕士生，研究方向为非负矩阵分解方法研究.

张建龙： 男，1976年生，博士后，讲师，研究方向为视频压缩编码、多媒体信号处理.

陈 涛： 男，1985年生，硕士生，研究方向为视频数字水印.