

## 针对一类 JPEG 图像伪造的被动盲取证

郑二功 平西建

(解放军信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

**摘要:** 图像合成是一种最常见的图像伪造手段。该文针对一类 JPEG 图像合成伪造, 根据篡改区域与非篡改区域块效应的不一致性, 提出了一种简单有效的检测算法。首先利用估计的一次压缩质量因子对待检测图像进行裁剪再压缩, 然后通过计算压缩前后的失真提取图像的块效应指数映射图, 最后采用图像分割的方法实现篡改区域的自动检测与定位。实验结果表明, 算法对于各种质量的 JPEG 图像和较小的篡改区域均能有效检测, 当二次压缩与一次压缩的质量因子之差在 15 以上, 虚警率控制在 5% 以内时, 检测率可达 93% 以上。

**关键词:** 图像取证; 合成图像; JPEG 二次压缩; 块效应指数

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0394-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00115

## Passive-Blind Forensics for a Class of JPEG Image Forgery

Zheng Er-gong Ping Xi-jian

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Compositing is the most common form of digital image forging. For a class of JPEG image forgery, a simple and effective detecting algorithm is proposed on the basis of inconsistencies of blocking artifacts between tampered region and non-tampered region. Firstly, a testing image is cropped and recompressed with the estimated primary quality factor. Secondly, blocking artifacts factor map is extracted via computing the distortion caused by recompression. Finally, automatic detection and location of tampered region is realized by using image segmentation. Experimental results demonstrate that the proposed approach is applicable to images of various qualities and lesser-tampered regions. When the difference of quality factors between double compression and single compression is greater than 15, the accuracy reaches above 93% with a less than 5% false positive rate.

**Key words:** Image forensics; Composite image; JPEG double compression; Blocking artifacts factor

### 1 引言

由于功能强大的图像处理软件的流行, 使得数字图像极易被篡改伪造, 为了鉴别图像的真实性, 数字图像取证技术成为一个具有时代需求的紧迫性课题。图像取证技术可以分为主动取证和被动取证两类<sup>[1]</sup>。主动取证技术以数字水印为代表, 它需在图像中预先嵌入一些特殊信息到图像中。被动取证技术是在不预先嵌入任何信息的前提下, 对图像的真实性和完整性进行鉴别。已有的被动盲取证技术大致可以分为三大类: 基于图像伪造过程遗留痕迹的盲检测技术<sup>[2-4]</sup>, 基于成像设备一致性的盲检测技术<sup>[5]</sup>, 基于自然图像统计特性的盲检测方法<sup>[6]</sup>。

然而, 现有盲取证算法大都要求待检测图像是未压缩的或者高质量压缩的图像, 针对广泛应用的 JPEG 图像的篡改检测算法还比较少。Fridrich 等<sup>[7]</sup>

最先提出了一种估计 JPEG 双重压缩原始量化步长的方法, 王俊文等<sup>[8]</sup>最近提出了一种估计原始量化步长的新方法, Luo<sup>[9]</sup>则研究了一种检测图像裁剪再压缩的方法。因正常的图像操作也可能导致二次压缩, 故上述方法并不能作为判断是否遭受篡改的依据。He<sup>[10]</sup>通过分析图像 DCT 系数的双重量化效应, 寻找局部二次压缩的痕迹, 首次实现了 JPEG 图像的篡改检测和篡改区域的自动定位。Li<sup>[11]</sup>根据提取的块效应网格的不匹配特性定位篡改区域, 但对篡改区域的识别需要人工完成。Ye<sup>[12]</sup>和李晟<sup>[13]</sup>则用一次压缩的质量因子对图像进行再压缩, 篡改区域的压缩失真会大于非篡改区域, 通过度量这种失真的不一致性, 实现 JPEG 图像的篡改检测。Farid<sup>[14]</sup>则用各种质量因子对 JPEG 图像进行再压缩, 当质量因子与篡改区域的质量因子一致时, 在篡改区域产生的压缩失真最小, 从而实现篡改区域的检测。但当篡改区域存在分块位置不一致时, 还要对 64 种分块方式下的图像进行再压缩, 计算量很大。

本文根据篡改区域与非篡改区域块效应的不一

2009-01-20 收到, 2009-07-08 改回

国家自然科学基金(60473022)资助课题

通信作者: 郑二功 zeg\_1980@tom.com

致性, 提取了图像的块效应指数映射图(Blocking Artifacts Factor Map, BAFM), 实现了一类JPEG伪造图像的自动检测和篡改区域的定位, 并且根据对大量图像的检测结果, 给出了鉴别JPEG图像为正常二次压缩图像或伪造图像的判决阈值。与文献[13]方法的定量比较表明, 本文方法的检测性能有很大提高, 尤其是检测小篡改区域的优势更明显。

## 2 JPEG图像的合成伪造模型

Farid在文献[15]中将图像的伪造手段分为6类: 合成(composited), 变体(morphed), 润饰(re-touched), 增强(enhanced), 计算机生成(computer generated), 绘画(painted)。其中, 合成图像则是最常见的一种伪造形式。JPEG图像合成即将一幅JPEG图像中的某个区域复制粘贴到另外一幅JPEG图像中的某个区域, 为了达到无缝拼接的效果, 一般会对合成区域的边缘做羽化、模糊等后处理, 最后再保存为JPEG格式的图像。图1所示为JPEG图像的合成伪造模型, 原始图像1, 原始图像2和合成图像的质量因子分别为 $QF_0$ ,  $QF_1$ 和 $QF_2$ , 本文研究对象为 $QF_1 < QF_2$ 时的伪造检测。图中的每个网格单元表示 $8 \times 8$ 的子块, 假设区域1的坐标为 $(x_1, y_1)$ , 区域2的坐标为 $(x_2, y_2)$ , 令 $m_1 = \text{mod}(|x_1 - x_2|, 8)$ ,  $m_2 = \text{mod}(|y_1 - y_2|, 8)$ , 假设 $m_1, m_2$ 在 $[0, 7]$ 范围内服从均匀分布, 那么 $p(m_1=0 \& m_2=0) = 1/8^2 = 1.5624\%$ , 说明区域1与区域2的 $8 \times 8$ 分块位置一致的概率很低, 且实际中为了获得好的拼接效果, 往往要求将区域1放置在特定的位置, 很难照顾到分块位置的一致性。因此, 可以认为, 在篡改区域普遍存在分块位置不一致的问题。图2给出了一个JPEG合成图像的样图。

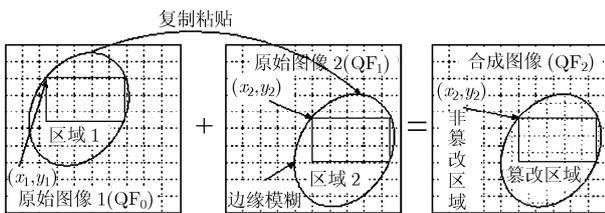


图1 JPEG图像的合成伪造模型

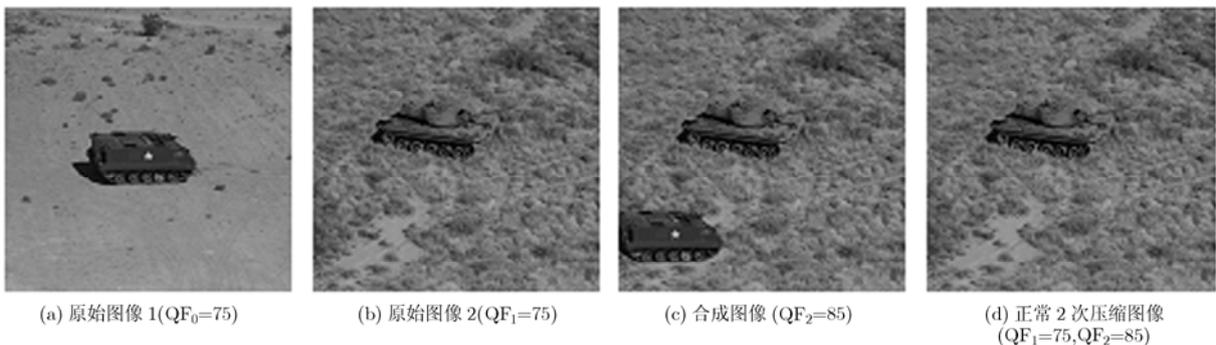


图2 JPEG合成图像和正常2次压缩图像的样图

## 3 算法描述

从图1可以看出, 伪造图像的非篡改区域经历了2次JPEG压缩, 因此, 本节首先给出一种简单快速的2次JPEG压缩检测算法, 得到2次压缩图像的前一次压缩的质量因子 $QF_1$ ; 然后用 $QF_1$ 对待检测图像进行裁剪再压缩, 并计算相应的压缩失真, 得到块效应指数映射图; 最后利用简单快速的图像分割算法, 分割块效应指数映射图, 并设定阈值判断图像是否为伪造图像。

### 3.1 JPEG2次压缩检测

文献[7]给出了一种估计原始量化步长的方法, 但该方法需要先训练, 实现比较复杂。本文拟采用文献[13]的思路, 与之不同的是, 本文直接在DCT域利用亮度分量进行2次压缩检测。算法的具体步骤如下:

(1) 估计2次压缩的质量因子 $QF_2$ : 从JPEG头文件中读取当前的量化表 $Q_2$ , 计算其与不同的质量因子 $QF$ 对应的量化表 $Q$ 的距离, 距离最小的量化表对应的质量因子即为 $QF_2$ , 即

$$QF_2 = \arg \min_{QF \in [30, 100]} \left( \sum_{l=0}^{20} |Q_2(l) - Q(l)| \right) \quad (1)$$

其中 $l$ 为量化表中按zigzag扫描次序的序号, 下同。由于不同的图像处理软件具有不同系列的量化表, 它们通常与标准量化表在高频的量化步长具有很大差异, 因此, 这里只比较zigzag扫描次序中0-20的系数。

(2) 估计前一次压缩的质量因子 $QF_1$  ( $QF_1 < QF_2$ ): 读取JPEG图像第 $i$ 个 $8 \times 8$ 子块量化后的DCT系数 $D_i$ , 并用 $Q_2$ 进行反量化, 然后用 $QF \in [30, QF_2 - 1]$ 对应的量化表 $Q$ 对反量化后的DCT系数进行再次量化, 并计算相应的平均量化失真 $E_q$ , 如式(2)所示, 其中 $N$ 为图像 $8 \times 8$ 子块的总个数。

$$E_q(QF) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{l=0}^{20} |D_i(l) \times Q_2(l) - Q(l)| \times \text{round}(D_i(l) \times Q_2(l) / Q(l)) \quad (2)$$

画出QF- $E_q$ 曲线，如果图像曾经历了质量因子为 $QF_1$ 的JPEG压缩，那么在QF- $E_q$ 曲线上 $QF=QF_1$ 处将会出现局部极小值，如图3所示，为图2(c)的QF- $E_q$ 曲线。从该曲线上可以清楚的看到在 $QF=75$ 附近出现极小值，如果能够准确地定位该极小值，也就得到了图像前一次JPEG压缩的质量因子 $QF_1$ 。为了定位曲线上的极小值，按式(3)计算得到图像的量化失真比例曲线，如图4所示。从图中可以看出，在 $QF=QF_1$ 处出现一个全局的最大值，如果 $\max(KEq(QF)) > Th1$ ，则判定图像经历了2次压缩，且最大的 $KEq$ 值所对应的质量因子即为 $QF_1$ 。其中，阈值 $Th1$ 将在第4节中通过对大量图像的统计结果来确定。

$$KEq(QF) = \frac{\sum_{i=-r}^r Eq(QF+i) - Eq(QF)}{2 \times R \times (Eq(QF) + \epsilon)} \quad (3)$$

其中 $\epsilon$ 为一个很小的数，为了使 $Eq=0$ 时公式仍有意义， $r$ 为当前点的邻域半径，取值为3。

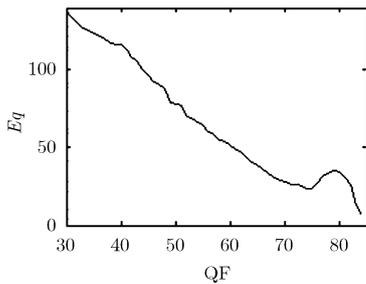


图3 图2(c)的量化失真曲线

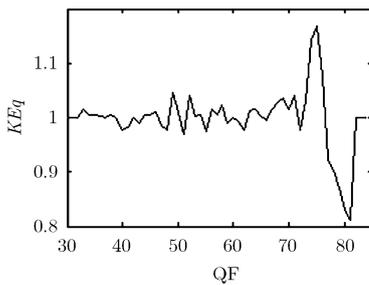


图4 图2(c)的量化失真比例曲线

### 3.2 BAFM(Blocking Artifacts Factor Map)的提取

对一幅 $M$ 行 $N$ 列的图像，裁剪前 $i$ 行 $j$ 列( $i, j=0,1, \dots,7$ )，然后重新进行 $8 \times 8$ 分块，共有64种分块方式。采用质量因子 $QF_1$ ，对待检测图像进行裁剪再压缩，然后在空域内计算压缩前后的失真，如式(4)所示：

$$d_{i,j}(x,y) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [f(x,y,k) - f_{i,j}(x,y,k)]^2, \quad i, j = 0,1, \dots, 7 \quad (4)$$

其中 $f(x,y,k)$ 表示待检测图像， $f_{i,j}(x,y,k)$ 表示裁剪再

压缩后的图像， $K$ 表示图像的通道个数，对于灰度图像， $K=1$ ，对于RGB彩色图像 $K=3$ 。需要注意的是，由于裁剪的原因，计算时 $f(x,y,k)$ 舍去了前8行8列， $f_{i,j}(x,y,k)$ 舍去了前 $8-i$ 和 $8-j$ 列，因此，矩阵 $d_{i,j}$ 的大小为 $(M-8) \times (N-8)$ 。

将64个矩阵 $d_{i,j}$ 按照式(5)组合为一个 $(M-8) \times (N-8)$ 大小的矩阵，即将 $d_{i,j}$ 中互不重叠的 $8 \times 8$ 子块的平均值放置在矩阵 $\delta$ 中相同位置的 $8 \times 8$ 子块的第 $i$ 行第 $j$ 列。

$$\delta(x+i, y+j) = \frac{1}{8^2} \sum_{bx=0}^7 \sum_{by=0}^7 d_{i,j}(x+bx, y+by) \quad (5)$$

其中 $i, j=0,1, \dots, 7$ ， $x, y$ 为互不重叠的 $8 \times 8$ 子块的左上角坐标。

显然，当再压缩时的分块方式与待检测图像前一次压缩的分块方式一致时，产生的失真最小。对于正常2次压缩图像和伪造图像的非篡改区域，在裁剪0行0列再压缩时的失真最小，在其它63种分块方式下产生的失真较大；而对于篡改区域，裁剪0行0列再压缩的失真较大。上述差异正是本文用于区分篡改区域与非篡改区域的依据。为了进一步增强这种差异，减少图像内容的影响，将矩阵 $\delta$ 分成互不重叠的 $16 \times 16$ 宏块，对每个宏块中的4个 $8 \times 8$ 子块进行叠加得到矩阵 $\delta_2$ 。

定义 $R$ 为一个 $8 \times 8$ 子块 $X$ 的块效应指数：

$$R = Y/(S + \epsilon) \quad (6)$$

其中 $Y = X_{0,0}$ ， $S = \frac{1}{63} \left( \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 X_{i,j} - X_{0,0} \right)$ ， $\epsilon$ 为一个很小的数，为了使 $S=0$ 时公式仍有意义。

将矩阵 $\delta_2$ 分成互不重叠的 $8 \times 8$ 子块，计算每个子块的块效应指数 $R$ ，然后对所有的 $R$ 值进行 $3 \times 3$ 的中值滤波处理，就得到了待检测图像的BAFM。图5(a), 5(b)分别为图2(c), 2(d)的BAFM，从图5(a)中可以看出篡改区域的 $R$ 值远大于非篡改区域的 $R$ 值。

### 3.3 正常图像与伪造图像的区分

一幅被检测为2次JPEG压缩的图像，可能是伪造图像，也可能是正常的图像经历了两次不同质量因子的压缩，二者如何区分？观察图5(a), 5(b)的直方图(图5(c), 5(d))可以发现，正常2次压缩图像的BAFM值较小且分布比较集中；而伪造图像的BAFM可以很明显的划分为两个部分，较大的值对应于篡改区域，较小的值对应于非篡改区域。因此，本文采用图像分割的方法将BAFM划分为两个区域，然后根据两个区域的均值的差值来判断图像是否为伪造图像。这里采用简单快速的全局阈值分割

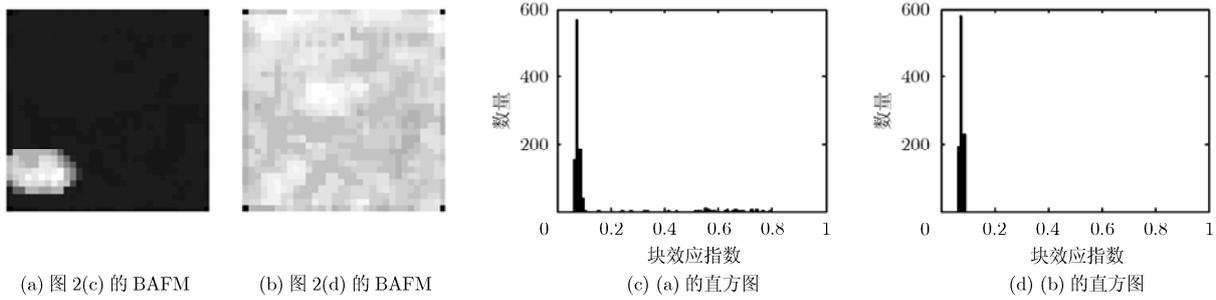


图5 提取的BAFM及其直方图

算法, 且不考虑BAFM中值为0的点, 自动寻找分割阈值  $T$  的过程如下:

- (1)选择  $T$  的初始估计值  $T_0$ , 设置循环次数  $c=0$ ;
- (2)用  $T_0$  分割BAFM, 生成了两个区域  $G_1$  和  $G_2$ ;
- (3)对区域  $G_1$  和  $G_2$  中的所有元素计算平均值  $\mu_1$  和  $\mu_2$ ;

(4)计算新的阈值:  $T=(\mu_1 + \mu_2)/2$ ; 循环次数  $c=c+1$ ;

(5)如果  $|T-T_0|<p$  或者  $c>q$ , 结束; 否则,  $T_0=T$ , 重复步骤(2)-步骤(4)。其中  $p, q$  为预先设定好的参数。

用  $T$  分割BAFM, 得到的两个区域的均值分别为  $\mu_1$  和  $\mu_2$ , 定义一个度量算子  $K$

$$K = |\mu_1 - \mu_2| \quad (7)$$

当  $K>Th2$  时, 判待检测图像为伪造图像, 否则判为正常2次压缩图像, 阈值  $Th2$  的选择将在实验部分给出。

#### 4 实验结果与分析

UCID<sup>[16]</sup> 为未压缩TIFF格式图像库, 使用其中的前500张图像生成实验用图像库。  $QF_2$  在区间  $[75,95]$  之间随机选择,  $QF_2-QF_1 \in \{5,10,15,20,25\}$ ,  $QF_1-QF_0 \in \{-10,0,10,20\}$ ,  $m_1, m_2$  在  $[0,7]$  范围内服从均匀分布, 且不同时为0。由  $QF_1$  压缩原始TIFF格式的图像, 生成一次JPEG压缩图像  $500 \times 5 = 2500$  幅, 再由  $QF_2$  生成正常2次压缩图像  $500 \times 5 = 2500$  幅, 用  $QF_0$  压缩TIFF图像, 并将图像的中心区域(大小为  $64 \times 64$  或  $128 \times 128$ ) 复制粘贴至由  $QF_1$  得到的图像的同位置, 并使坐标偏移为  $(m_1, m_2)$ , 然后以  $QF_2$  重新压缩保存, 生成JPEG合成图像  $500 \times 5 \times 4 \times 2 = 20000$  幅。

首先对1次压缩图像和2次压缩图像进行JPEG 2次压缩检测, 确定阈值  $Th1$ 。此时的检测率  $TP$  定义为2次压缩图像被正确识别的比率, 虚警率  $FP$  定义为1次压缩图像被误识为2次压缩图像的比率。本文方法得到的ROC曲线如图6中实线所示, 文献[13]中仅给出了判断2次压缩的经验阈值, 为了与本文方法

进行比较, 这里给出了其在本文建立的图像库上得到的ROC曲线如图6中虚线所示, 从ROC曲线下方的面积(AUC)可以看出, 本文方法的检测性能有了很大提高。本文选择虚警率为5%时的阈值  $Th1=1.08$  作为判断图像为2次压缩图像的阈值, 得到的2次压缩检测率列于表1第2行。从表中可以看出, 当  $QF_2-QF_1 \geq 10$  时, 本文方法能够可靠的检测出JPEG 2次压缩; 当前后两次压缩的质量因子相差较小( $QF_2-QF_1=5$ )时, 本文算法的检测率较低(此情况对于现有检测算法均较困难)。表1第3行还列出了文献[13]方法得到的检测结果, 此时的虚警率为13.5%, 而检测率仍远低于本文方法。综上可知, 本文的2次压缩检

表 1 2 次压缩图像的检测率(%)

$QF_2-QF_1$	5	10	15	20	25
本文方法	59.6	97.0	100	100	100
文献[13]	15.4	37.6	62.6	74.4	76.0

测算法远优于文献[13]的方法, 因此, 在后续的伪造检测算法比较时, 均采用本文的2次压缩检测方法。

然后对正常2次压缩图像和JPEG合成图像进行伪造检测。此时的检测率  $TP$  定义为JPEG合成图像被正确识别的比率, 虚警率  $FP$  定义为正常2次压缩图像被误识为JPEG合成图像的比率, 检测率  $TN$  定义为正常2次压缩图像被正确识别的比率, 需要注意的是, 正常2次压缩图像可能被误识为合成图像也可能被误识为1次压缩图像, 所以  $TN$  与  $FP$  之和不等于1。图7所示为实验得到的ROC曲线, 曲线末尾的拐点是由于部分待检测图像被误识为1次压缩图像所致。从AUC值可以看出本文的伪造检测算法明显优于文献[13]的方法。选择总体虚警率为5%时的阈值作为判断图像为伪造图像的判决阈值, 其中本文方法的判决阈值为  $Th2=0.245$ , 文献[13]方法的判决阈值为0.405(若采用文献[13]中的经验阈值0.2, 则虚警率高达32.2%), 得到的检测结果列于表2, 从表中可以得出以下结论:

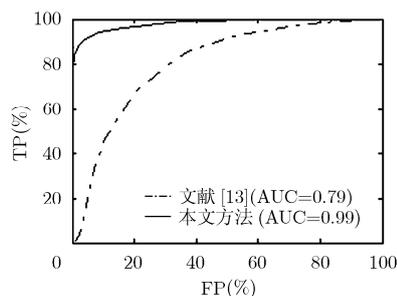


图6 JPEG2次压缩检测的ROC曲线

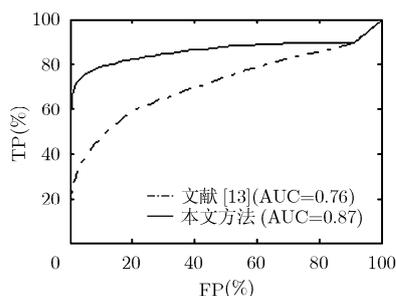


图7 伪造检测的ROC曲线

表2 虚警率为5%时JPEG合成图像的检测率(%)

$QF_2-QF_1$	篡改区域大小	$QF_1-QF_0$							
		-10		0		10		20	
		文献[13]	本文	文献[13]	本文	文献[13]	本文	文献[13]	本文
5	64×64	4.2	17.2	4.0	16.8	3.8	15.6	3.4	17.4
	128×128	9.2	23.2	9.0	23.0	8.8	23.8	9.2	22.6
10	64×64	16.2	62.2	14.6	60.6	14.0	60.2	12.8	59.4
	128×128	35.6	69.0	33.4	68.0	32.0	69.0	31.6	67.8
15	64×64	29.8	95.4	27.8	93.4	28.6	94.6	26.0	93.0
	128×128	61.2	97.8	59.6	98.0	57.4	97.6	57.0	98.0
20	64×64	38.2	99.4	34.2	99.0	33.6	98.8	32.2	99.2
	128×128	80.2	99.8	78.2	99.8	78.2	99.8	75.0	100
25	64×64	42.8	99.8	39.6	98.8	39.8	99.6	39.4	99.4
	128×128	83.2	99.8	81.2	99.6	78.8	99.8	79.8	99.6

(1) $QF_2$ 与 $QF_1$ 的差值越大,检测率越高; $QF_2$ 与 $QF_1$ 的差值相同时,篡改区域越大,检测率越高;

(2) $QF_1$ 与 $QF_0$ 的大小关系对伪造检测基本无影响;

(3)本文算法全面优于文献[13]的方法,尤其对于小篡改区域的优势更明显,如 $QF_2-QF_1=15$ 时,本文方法对64×64大小的篡改区域的检测率在93%以上,而文献[13]方法的检测率只有不到30%。

本文的伪造检测方法优于文献[13]方法的主要原因是:首先,文献[13]只利用了一种分块方式下的压缩失真,是一个绝对值,容易受图像内容的影响,而本文利用了64种分块方式下压缩失真的比例信息,因此得到的块效应指数的值更稳定,受图像内容的影响小;其次,与文献[13]采用的压缩失真直方图对称性度量算子 $\beta$ 相比,本文采用的基于直方图分割的度量算子 $K$ 对于小篡改区域更敏感,具有更好的区分性。

为了更直观的说明本文算法的检测结果,下面给出一个检测小篡改区域的实例。图8(a)是一幅质量因子为75的原始JPEG图像,图像大小为512×

512,将其中的帆船复制粘贴到同一幅图像的另外一个区域,然后将合成图像压缩保存为质量因子为85的JPEG图像,如图8(b)所示。图8(c)为图8(b)的BAFM,可以看出篡改区域的块效应指数明显高于其它区域,分割图8(c),得到的度量算子 $K=0.349 > Th_2=0.245$ ,因此,可以判断图8(b)为JPEG合成伪造图像,篡改区域的检测结果如图8(d)所示(白色区域表示检测为篡改的区域)。而采用文献[13]的方法首先是无法正确检测2次压缩,即使在正确检测2次压缩的前提下,得到的压缩失真直方图对称性度量算子 $\beta=0.002 < 0.2$ ,合成图像也将被误判为正常图像。

## 5 结束语

本文针对一类JPEG合成伪造图像,利用伪造过程中遗留的JPEG压缩痕迹,提出了一种简单有效的检测算法,并实现了篡改区域的自动定位。本文算法的优点是可以有效地检测各种质量的JPEG图像,并可以检测较小的篡改区域。但同时也可以看到,当伪造图像以一个低于原始图像的质量因子保存时该算法将失效。由于JPEG压缩相当于一个低通滤

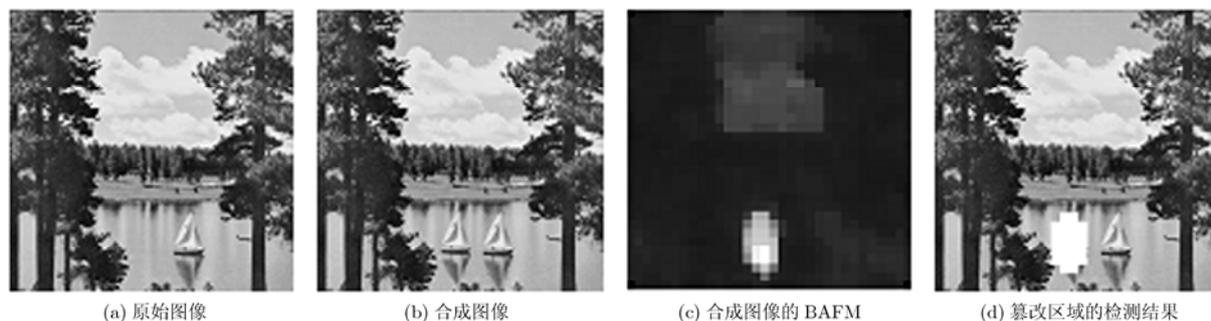


图8 检测小篡改区域的实例

波, 当以一个更低的质量因子压缩伪造图像时, 篡改区域原来的JPEG压缩痕迹将被破坏, 使检测更加困难。对于这类JPEG合成图像, 今后我们将作进一步的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 周琳娜. 数字图像盲取证技术研究[D]. [博士学位论文], 北京邮电大学, 2007.  
Zhou Lin-nan. Study of digital forensics based on image content[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007.
  - [2] Fridrich J, Soukal D, and Lukas J. Detection of copy-move forgery in digital images[C]. Digital Forensic Research Workshop Proceedings, Cleveland, OH, USA, Aug. 6-8, 2003: 1-10.
  - [3] Popescu A C and Farid H. Statistical tools for digital forensics[C]. 6th International Workshop on Information Hiding Proceedings, Toronto, Canada, May, 2004: 128-147.
  - [4] Mahdian B and Saic S. Blind authentication using periodic properties of interpolation[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(3): 529-538.
  - [5] Lukas J, Fridrich J, and Goljan M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise[C]. SPIE Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VIII Proceedings, San Jose, California, USA, 2006, 6072: 362-272.
  - [6] Shi Y Q, Chen C, and Chen W. A natural image model approach to splicing detection[C]. ACM 9th Workshop on Multimedia and Security Proceedings, Dallas, Texas, USA, September, 2007: 51-62.
  - [7] Lukas J and Fridrich J. Estimation of primary quantization matrix in double compressed JPEG images[C]. Digital Forensic Research Workshop Proceedings, Cleveland, OH, USA, Aug. 6-8, 2003: 67-84.
  - [8] 王俊文, 刘光杰, 戴跃伟等. 一种估计 JPEG 双重压缩原始量化步长的新方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 31(4): 836-839.  
Wang Jun-wen, Liu Guang-jie, and Dai Yue-wei, et al. A new method for estimating the primary quantization step of JPEG double-compression[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 836-839.
  - [9] Luo Wei-qi, Qu Zhen-hua, and Huang Ji-wu, et al. A novel method for detecting cropped and recompressed image block[C]. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing Proceedings, Hawaii, USA, 2007: 217-220.
  - [10] He J F, Lin Z C, and Wang L F, et al. Detecting doctored JPEG images via DCT coefficient analysis[C]. 9th European Conference on Computer Vision Proceedings, Graz, Austria, 2006: 423-435.
  - [11] Li Wei-hai, Yu Neng-hai, and Yuan Yuan. Doctored JPEG image detection[C]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo Proceedings, Hannover, Germany, 2008: 253-256.
  - [12] Ye Shui-ming, Sun Qi-bin, and Chang Ee-chien. Detecting digital image forgeries by measuring inconsistencies of blocking artifact[C]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo Proceedings, Beijing, China, 2007: 12-15.
  - [13] 李晟, 张新鹏. 利用 JPEG 压缩特性的合成图像检测[J]. 应用科学学报, 2008, 26(3): 281-287.  
Li Sheng and Zhang Xin-peng. Detection of compressed images based on JPEG compression properties[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2008, 26(3): 281-287.
  - [14] Farid H. Exposing digital forgeries from JPEG ghosts[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2009, 4(1): 154-160.
  - [15] Farid H. Creating and detecting doctored and virtual images: Implications to the child pornography prevention act. <http://www.ists.dartmouth.edu/library/tr-2004-518.pdf>. 2008. 2.
  - [16] Schaefer G and Stich M. UCID-An uncompressed colour image database, Technical Report, School of Computing and Mathematics, Nottingham Trent University, U.K. 2003.
- 郑二功: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为图像处理、信息隐藏、数字取证。  
平西建: 男, 1953年生, 教授, 研究方向为图像处理、模式识别、信息隐藏。